

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky 410

Návrh vytápění rodinného domu tepelným čerpadlem
Suggestion of heating with heating pumps

2010

Jan Šrámek

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou/diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě

.....
podpis studenta

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá technickým návrhem tepelného čerpadla pro vytápění a ekonomickým posouzením jeho provozu.

Teoretická část je zaměřena na princip tepelných čerpadel. Obsahuje popis funkce, parametrů, typy tepelných čerpadel, způsoby instalací a jejich užití. Dále je zde popis a způsob návrhu primárních okruhů pro tepelná čerpadla. Jsou zde uvedeny jejich výhody, nevýhody a přesný postup dimenzování.

Praktická část obsahuje variantní řešení vytápění na zvoleném rodinném domu. Je proveden komplexní návrh tří systému pro vytápění. Prvním krokem je výpočet tepelných ztrát a určení potřeby tepla, volba zdroje a technické řešení celého rozvodu vytápění.

Následuje část, která se věnuje ekonomické analýze, jejíž součástí je hodnocení systému vytápění pomocí multikriteriální analýzy, podle zvolených kritérií.

Na závěr je provedeno zhodnocení dosažených výsledků, celé práce a jejího budoucího možného rozvoje.

Klíčová slova

Tepelné čerpadlo, topný faktor, nízko potenciální energie, vytápění, tepelné ztráty, potřeba tepla.

Abstrakt anglicky

This work addresses technical suggestion of heating pump and economic appraisal of its running.

The theoretical part addresses principle of heating pumps including description of function, properties, type of heating pumps, method of installations and their use. There are also described methods of projecting primary circles for heating pumps, their benefits, handicaps and exact procedure of dimensioning.

The practical part addresses various suggestions of heating on chosen property. Complex suggests three systems of heating. The first step is calculating heat loss and heat demand, choice of source and technical resolution of heating distribution.

Following part addresses economic analysis, which includes evaluation of heating systems by multi criterion analysis with choice of criteria.

In conclusion there is an evaluation of complete work, achieved results and its future development.

Key words

Heating pumps, coefficient of performance, low potential energy, thermal heating, heat loss, heat demand.

Obsah

1. Úvod	1
2. Problematika vytápění	2
2.1. Tepelná pohoda.....	2
2.2. Teplota prostředí.....	2
3. Teoretický rozbor principu a druhů tepelných čerpadel.....	4
3.1. Princip tepelného čerpadla.....	4
3.2. Parametry a zařízení tepelného čerpadla	5
3.2.1. <i>Topný faktor</i>	6
3.3. Kompresor Scroll.....	7
3.3.1. <i>Chladivo</i>	7
3.4. Modulace výkonu tepelného čerpadla	8
3.4.1. <i>Princip modulace</i>	8
3.5. Rozšířené funkční zapojení tepelného čerpadla	10
3.5.1. <i>Systém s přehřátím</i>	10
3.5.2. <i>Systém se vstřikováním do kompresoru</i>	10
3.6. Způsob provozu tepelného čerpadla	11
3.6.1. <i>Monovalentní provoz</i>	11
3.6.2. <i>Monoenergetický provoz</i>	11
3.6.3. <i>Bivalentní paralelní provoz</i>	12
3.6.4. <i>Bivalentní alternativní provoz</i>	12
3.7. Typy tepelných čerpadel.....	12
3.7.1. <i>Vzduch/voda</i>	12
3.7.2. <i>Nemrznoucí směs/voda</i>	13
3.7.3. <i>Voda/voda</i>	13
3.7.4. <i>Voda nebo vzduch/vzduch</i>	13
3.8. Soustava tepelného čerpadla.....	14
3.8.1. <i>Zapojení soustavy tepelného čerpadla</i>	14
3.8.2. <i>Akumulace</i>	15
3.8.3. <i>Ohřev teplé užitkové vody</i>	15
3.8.4. <i>Ohřev bazénu</i>	15
3.8.5. <i>Chlazení</i>	16
3.9. Ekvitermní regulace tepelného čerpadla.....	16
3.9.1. <i>Ekvitermní křivky</i>	16
3.9.2. <i>Ekvitermní regulátor</i>	17
3.9.3. <i>Zapojení ekvitermní regulace</i>	17
4. Zásady návrhu primárních okruhů	18
4.1. Zdroje nízkopotenciálního tepla	18
4.2. Zemní plošný kolektor	19
4.2.1. <i>Způsob uložení</i>	19
4.2.2. <i>Dimenzování kolektoru a odběr tepla</i>	19
4.3. Geotermální vertikální sondy	21
4.3.1. <i>Podmínky zhotovení</i>	21
4.3.2. <i>Dimenzování vrtu</i>	21
4.3.3. <i>Realizace a výstroj vrtu</i>	22
4.4. Vzduch.....	23

4.4.1.	Venkovní vzduch.....	23
4.4.2.	Vnitřní vzduch	23
5.	Variantní řešení vytápění rodinného domu	24
5.1.	Výpočet energetické náročnosti.....	24
5.1.1.	Potřeba energie na vytápění a přípravu teplé užitkové vody.....	25
5.1.2.	Určení potřeby energií pro RD	26
5.2.	Varianta (a ₁) vytápění tepelným čerpadlem Vzduch/Voda	27
5.2.1.	Bivalentní provoz	27
5.2.2.	Zapojení systému.....	29
5.3.	Varianta (a ₂) vytápění tepelným čerpadlem Země/Voda	30
5.3.1.	Dimenzování vrtu	30
5.3.2.	Zapojení soustavy tepelného čerpadla země/voda	31
5.4.	Podlahové vytápění pro tepelná čerpadla	32
5.4.1.	Regulace podlahového vytápění a otopného tělesa.....	33
5.4.2.	Náklady na podlahové vytápění a otopná tělesa.....	33
5.5.	Varianta (a ₃) vytápění elektrickým teplovodním kotlem	34
5.5.1.	Zapojení soustavy.....	34
5.6.	Rozvod vytápění pro elektrický teplovodní kotel.....	35
5.6.1.	Regulace ústředního vytápění	35
6.	Ekonomické zhodnocení s výhledem na životnost.....	36
6.1.	Určení provozních a investičních nákladů variant vytápění.....	36
6.1.1.	Doba návratnosti investic	38
6.2.	Analýza variant a určení nejvhodnějšího vytápění.....	39
6.2.1.	Stanovení kritérií.....	40
6.2.2.	Určení vah kritérií.....	40
6.2.3.	Metoda váženého součtu WSA	41
6.2.4.	Volba nejlepší varianty vytápění.....	42
7.	Závěr.....	43
	Seznam použité literatury	44
	Seznam příloh	45

1. Úvod

Tato diplomová práce se zabývá problematikou návrhu vytápění pomocí tepelných čerpadel. V dnešní době je stále více kladen důraz na obnovitelné zdroje energie a to nejen pro výrobu elektřiny, ale i pro produkci tepla pro vytápění a ohřev teplé vody. Důvodem jsou ztenčující se zásoby fosilních paliv a také potlačování narůstajícího nebezpečí klimatických změn v důsledku globálního oteplování. Tepelná čerpadla jsou významným zařízením pro výrobu tepla z obnovitelné energie. Jejich provoz snižuje nepřímo produkci skleníkových plynů. Jejich provozní náklady jsou několikanásobně nižší než u jiných vytápění, která využívají jako palivo fosilní zdroje. Tato práce se snaží ověřit, že všechny tyto argumenty převládají nad vyššími investičními náklady do tepelných čerpadel, při porovnání s jinými zdroji pro vytápění. Snaží se také popsat problematiku technického řešení vytápění, právě pomocí tepelných čerpadel.

Práce popisuje danou problematiku v několika kapitolách, první dva okruhy jsou věnovány teoretickému rozboru tepelných čerpadel a následující kapitoly obsahují praktické řešení vytápění.

V první okruhu je uveden popis principu a funkce tepelného čerpadla a také všech součástí nutných pro funkci celého systému vytápění s tepelným čerpadlem.

V další části je uveden popis zdrojů nízkopotenciální energie a také způsoby návrhu primárních okruhů pro odběr této energie.

Následuje část s variantním návrhem vytápění na reálném rodinném domu. Je zde postup výpočtů tepelný ztrát, určení potřeby tepla pro vytápění a ohřev pitné vody, volba tří různých zdrojů, konkrétní návrh rozvodu vytápění a způsob zapojení každé zvolené soustavy vytápění.

Předposlední část obsahuje detailní ekonomické zhodnocení se stanovením investičních a provozních nákladů. Určení návratnosti investice variant vytápění pomocí tepelných čerpadel a určení nejvhodnějšího systému pro vytápění podle zvolených ekonomicko-technických kritérií.

Poslední část se zabývá již zhodnocením zjištěných výsledků a možností budoucího rozvoje.

2. Problematika vytápění

V obytných prostorách se snažíme po celý rok udržet teplotu pro zachování tepelné pohody. Požadované teploty je dosaženo v zimě vytápěním, v létě klimatizací, pokud je to nutné, a také vhodným větráním. Účelem vytápění je tedy zajistit v obytných prostorech během topného období takové tepelné poměry, aby byla zajištěna tzv. tepelná pohoda člověka.

V současnosti je moderní trend zavádění způsobů vytápění šetrných k životnímu prostředí, jako jsou kotle na spalování biomasy a podobně. Tepelná čerpadla jsou vhodnou alternativou, i když potřebují ke svému provozu část elektrické energie, dosahují také mnohem většího komfortu vytápění a to díky prakticky bezobslužnému provozu.

2.1. Tepelná pohoda

Tepelná pohoda je stav, při němž člověk nemá pocit chladu, ani nadměrného tepla. Člověk by tedy měl být spokojen s tepelným stavem prostředí, a aby toho bylo dosaženo musí, být splněna podmínka tepelné rovnováhy podle:[1]

$$Q_M = Q_V + Q_D + Q_K + Q_S \quad (W) \quad (1)$$

Q_M teplo vyprodukované lidským tělem,

Q_V teplo odvedené vypařováním,

Q_D teplo odváděné dýcháním,

Q_K teplo odváděné prouděním,

Q_S teplo odvedené sáláním.

2.2. Teplota prostředí

Výsledná teplota prostředí, která ovlivňuje jedince v místnosti, je dána faktory prostředí a jsou to:

- teplota vzduchu,
- teplota okolních ploch,
- vlhkost vzduchu prostředí,
- proudění vzduchu,

a také je ovlivněna faktory stavu dané osoby:

- produkce tepla člověkem,
- propustností oděvu.

Teplota vzduchu v dané místnosti není většinou konstantní a mění se především ve vertikálním směru. Nerovnoměrnost rozložení teploty vzniká především nevhodným umístěním otopných těles a různým ochlazováním okolních stěn. Pokud je místnost nebo respektive celý dům dobře tepelně izolován, tak teplota vzduchu a okolních ploch se bude lišit velmi nepatrně. V tomto případě lze teplotu vzduchu považovat za uspokojivé měřítko tepelné pohody člověka.

V případě, kdy tepelná izolace místnosti není dostatečná, je teplota okolních ploch malá a toto musí být kompenzováno vyšší teplotou otopných těles, aby bylo dosaženo tepelné pohody.

Rozložení teplot v místnosti by mělo být obecně větší u podlahy a menší u stropu, teplotní rozdíl mezi hlavou a chodidly člověka by neměl být větší než 2 °C. Těmto nárokům nejlépe vyhovuje podlahové vytápění.

Pro hodnocení stavu prostředí ve vztahu k tepelné pohodě se zavádí pojem operativní teplota, což vlastně představuje výslednou teplotu prostředí. Abychom tuto operativní teplotu mohli určit, musíme znát teplotu vzduchu a teploty okolních ploch místnosti.[1],[11].

$$t_{op} = \sum_{j=1}^n \varphi_j \cdot t_j \quad (^\circ\text{C}) \quad (2)$$

t_{op} výsledná teplota okolních ploch

Výslednou operativní teplotu prostředí t_o lze určit i měřením, kde je nutno zjistit hodnoty teploty vzduchu, teploty okolní ploch a rychlost proudění vzduchu, a poté platí:

$$t_o = A \cdot t_v + (1 - A) \cdot t_{op} \quad (^\circ\text{C}) \quad (3)$$

t_o výsledná operativní teplota (°C),

A součinitel v závislosti na rychlosti proudění vzduchu (-),

t_v teplota vzduchu v místnosti (°C),

t_{op} výsledná teplota okolních ploch (°C).

Tab. 1 Hodnoty součinitele A v závislosti na rychlosti proudění. [11]

$v \text{ (m.s}^{-1}\text{)}$	0,2	0,3	0,4	0,6	0,8	1
$A \text{ (-)}$	0,5	0,53	0,6	0,65	0,7	0,75

Tepelná pohoda člověka při jeho vnitřní produkci tepla a propustnosti oblečení, je tedy ovlivněna teplotou vzduchu a teplotou okolních ploch. Poměr těchto hodnot by však neměl být libovolný.[11]

3. Teoretický rozbor principu a druhů tepelných čerpadel

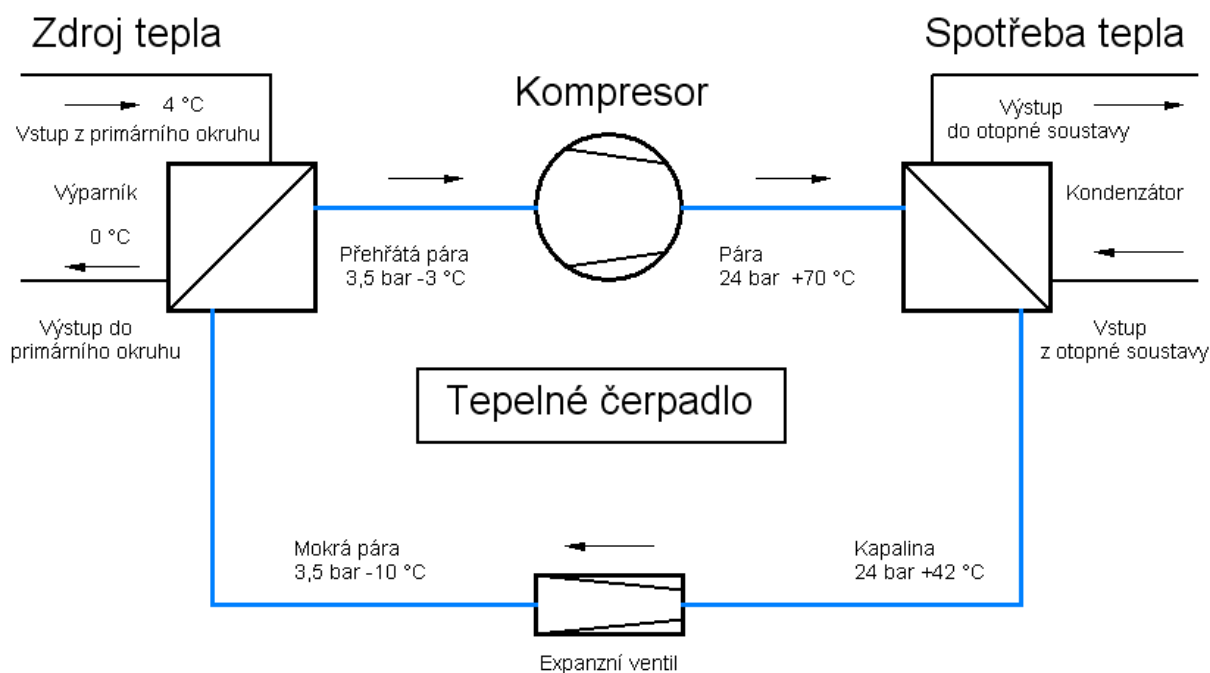
Tepelné čerpadlo ovšem využívá energii obsaženou ve vzduchu, vodě nebo půdní vrstvě, tedy obnovitelnou energii. Tuto energii přečerpává, díky dodání vnější energie, pro vytápění domu nebo ohřev teplé vody. Existuje více druhů tepelných čerpadel, které se liší principem a konstrukcí, ale v této práci se budu zabývat dnes nejrozšířenějším a to kompresorovým tepelným čerpadlem (dále už jen tepelné čerpadlo), jež je poháněno elektrickou energií.[4]

3.1. Princip tepelného čerpadla

Tepelné čerpadlo lze přirovnat k principu chladničky, která ochlazuje potraviny a odejmutým teplem vytápí místnost. Tepelné čerpadlo se obecně skládá ze čtyř základních částí (Obr. 1):

- 1) Výparník
- 2) Kompresor
- 3) Kondenzátor
- 4) Expanzní ventil

Přenos energie v tepelném čerpadle zajišťuje speciální chladivo. Jedná se o uzavřený Cartonův cyklus. Do soustavy tepelného čerpadla také patří primární a sekundární okruh. Primární okruh zajišťuje odběr venkovní, tzv. nízkopotenciální energie a předává ji výparníku, zatímco sekundární okruh představuje otopnou soustavu odebírající tepelný výkon z kondenzátoru. Nejužívanější dnes jsou tepelná čerpadla předávající výkon teplovodní otopné soustavě, ale používají se i tepelná čerpadla pro teplovzdušné vytápění.[2],[3],[4]

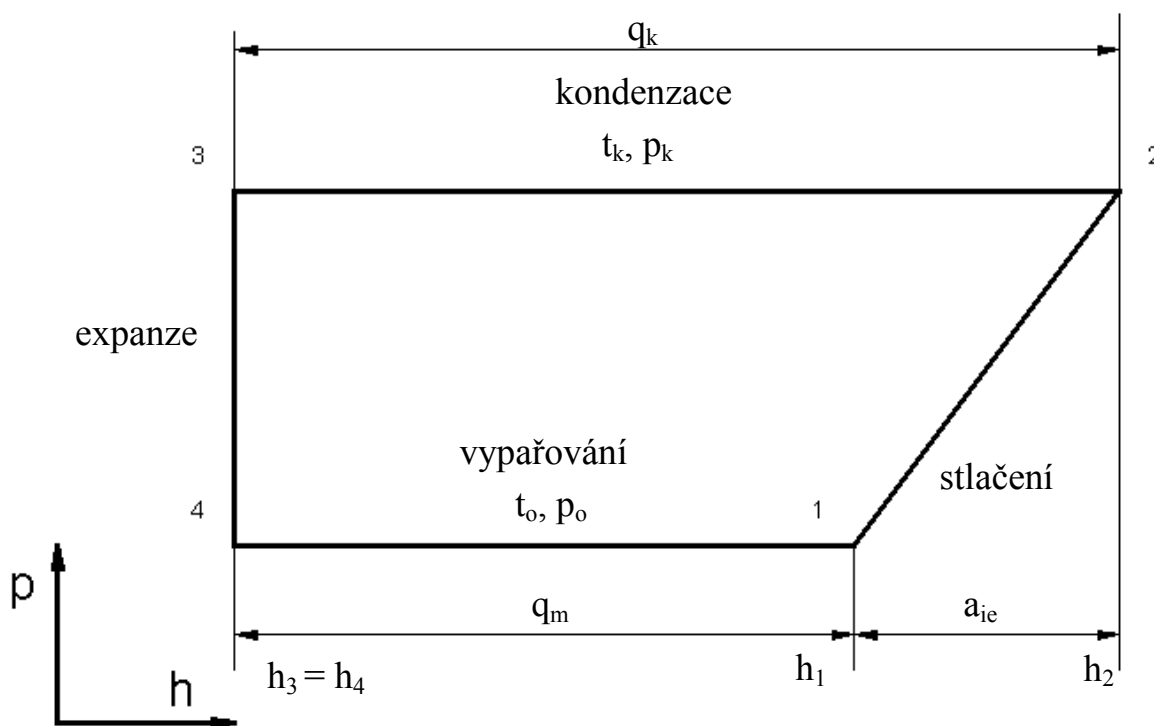


Obr. 1 Schéma základního funkčního zapojení tepelného čerpadla.

Tepelné čerpadlo využívá skutečnosti, že teplota varu (kondenzace) různých látek závisí na tlaku. Například čpavek NH_3 se vaří při atmosférickém tlaku (0,1 MPa) již při $-33\text{ }^\circ\text{C}$. Při stlačení na 20-ti násobek tlaku začne kondenzovat až při $50\text{ }^\circ\text{C}$. Čpavek se tedy dá dobře využít jako chladivo i pro tepelná čerpadla, ale v současnosti se užívají jiné typy chladiva. Například pod označením R407C a další. Lze se setkat i s propanem či oxidem uhličitým (CO_2).

Ve výparníku se chladivo vypaří za nízké teploty (t_0), protože je zde nižší tlak (p_0). Při této změně z kapaliny na páru se spotřebuje teplo (q_m) a toto teplo je právě tím, které se odebírá látce z venkovního prostředí (vzduch, voda, země). Chladivo již ve formě plynu je stlačeno kompresorem na vyšší tlak (p_k). Kompresor poháněný motorem dodá chladivu další energii (a_{ie}), tentokrát již ne ve formě tepla, ale práce. Tato dodaná energie (a_{ie}), kterou motor spotřebuje, se již musí zaplatit. Dále putuje chladivo do kondenzátoru, kde se částečně ochladí na teplotu (t_k) a zkondenzuje, ale stále má vysoký tlak. Při kondenzaci vznikne teplo (q_k), které odvádí voda v otopném systému. Teplo (q_k) je tedy energie, kterou získáme z tepelného čerpadla pro topení či ohřev vody. Chladivu je poté v expanzním ventilu snížen tlak na původní hodnotu (p_0) a cyklus se opakuje. [3],[4]

Znázornění oběhu v tepelném diagramu h-p



Obr. 2 Znázornění oběhu v tepelném čerpadle pomocí h-p diagramu (entalpie-tlak) [4].

Toto je popis základního principu tepelného čerpadla, ale existují i modifikované systémy zapojení pro dosažení především vyšších výstupních teplot.

3.2. Parametry a zařízení tepelného čerpadla

Tepelné čerpadlo má několik základních parametrů, jako je topný výkon, teplota výstupní vody, možnosti provozu, elektrický příkon a také především topný faktor. Všechny tyto parametry by měl uvádět výrobce nebo dodavatel tepelného čerpadla.

3.2.1. Topný faktor

Topný faktor nebo také výkonové číslo je nejdůležitějším parametrem tepelného čerpadla. Vyjadřuje potřebu elektrické energie pro produkci tepla dodaného otopné soustavě.

$$\varepsilon_T = \frac{Q}{E} \quad (-, kWh, kWh) \quad (4)$$

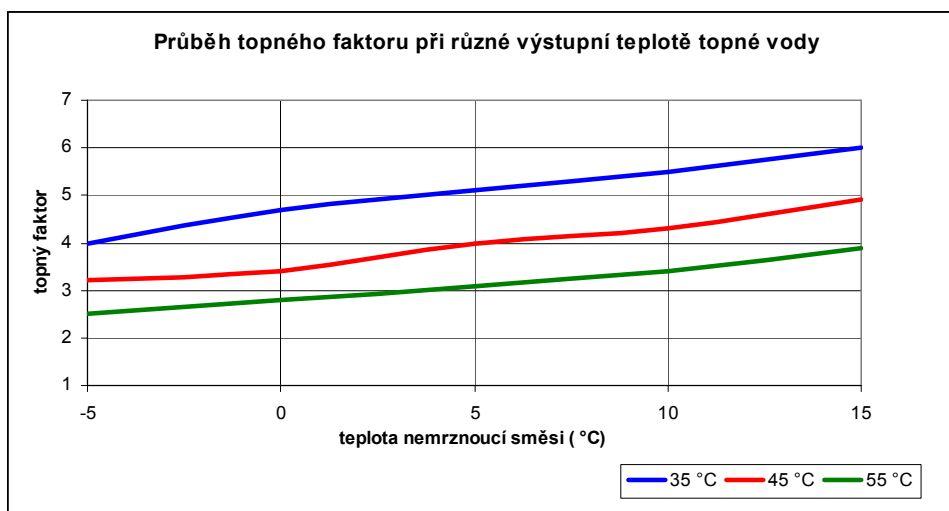
Energie Q je tedy teplo dodané pro vytápění a E je elektrická energie pro pohon čerpadla a topný faktor ε_T je bezrozměrné číslo. Do hodnoty E je nutno také započíst u tepelných čerpadel typu země/voda i spotřebu elektrické energie pro oběhová čerpadla. Jejich spotřeba je relativně malá. U tepelných čerpadel vzduch/voda je spotřeba ventilátorů, ochlazujících venkovní nebo vnitřní vzduch, vyšší, a proto je nutné všechny tyto náklady do cenové bilance započíst.

Topný faktor se mění během roku a jeho hodnota závisí na provozních podmínkách. Norma EN 14511 udává metodiku pro stanovení hodnoty topného faktoru v závislosti na teplotě vstupní a výstupní energie pro různé druhy tepelných čerpadel, aby bylo možno tato tepelná čerpadla mezi sebou objektivně porovnat (Tab. 2). [3],[4]

Tab. 2 Hodnoty pro srovnávání topného faktoru různých čerpadel. [3].

Zdroj tepla	Teplota chladiva vstup / výstup
vzduch	2 °C / 35 °C
země	0 °C / 35 °C
voda	10 °C / 35 °C

Je dobré vědět i hodnoty topného faktoru, pokud je to možné, ve více provozních stavech, protože teplota vstupní ochlazované látky může během roku kolísat, zejména u vzduchu. Poté můžeme určit celoroční topný faktor a určit vhodnost provozu tepelného čerpadla.



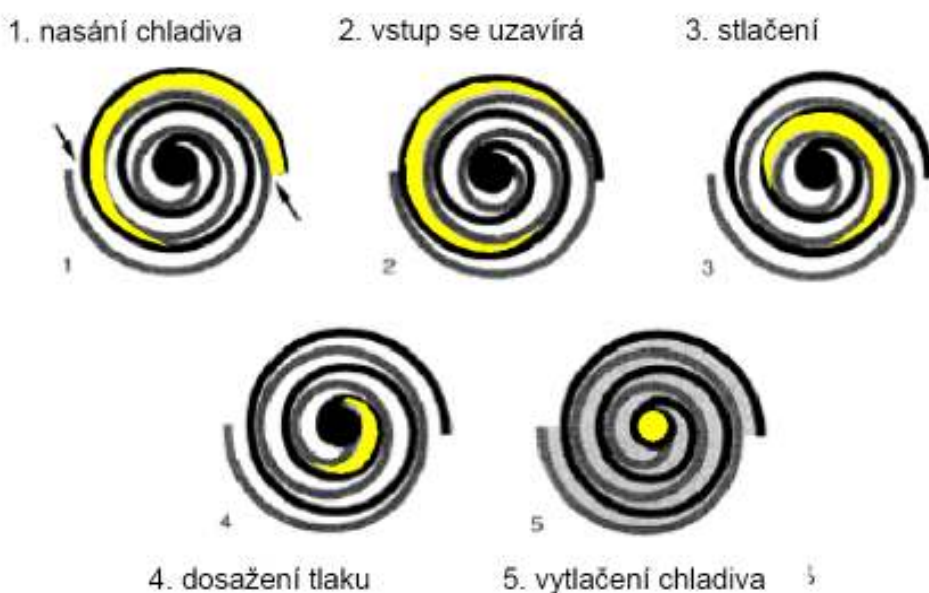
Obr. 3 Hodnoty topného faktoru tepelného čerpadla VITOCAL 300-G země/voda 108. [2].

Pro získání co největšího topného faktoru je tedy nejdůležitější rozdíl (teplotní difference) mezi teplotou vstupní (teplota zdroje) a teplotou topného systému. Čím je tento rozdíl menší, tím je topný faktor větší. Proto jsou tepelná čerpadla vhodná pro nízkoteplotní systémy.[5]

3.3. *Kompresor Scroll*

Dnes se jedná o nejužívanější typ a to z důvodu dosažení lepšího topného faktoru a také dobrou životností 80-100 tisíc pracovních hodin.

Kompresor je složen ze dvou spirál. První spirála je pevná a druhá pohyblivá a jsou uloženy proti sobě. Do prostoru mezi spirálami je nasáváno chladivo ve formě plynu. Po nasátí se pohyblivá spirála začne excentricky pohybovat v pevné spirále. Díky tomu se vytvoří uzavřený prostor, který se po obvodu spirál pohybuje směrem ke středu a neustále se chladivo zmenšuje, zvyšuje se jeho tlak a také teplota. Ve středu spirál je otvor pro výstup stlačeného chladiva. Při kontinuálním provozu je mezi spirálami šest uzavřených míst s chladivem, takže proces sání, stlačení a výstupu chladiva je téměř plynulý.[4],[5]



Obr. 4 Průběh komprese v kompresoru typu Scroll.[5]

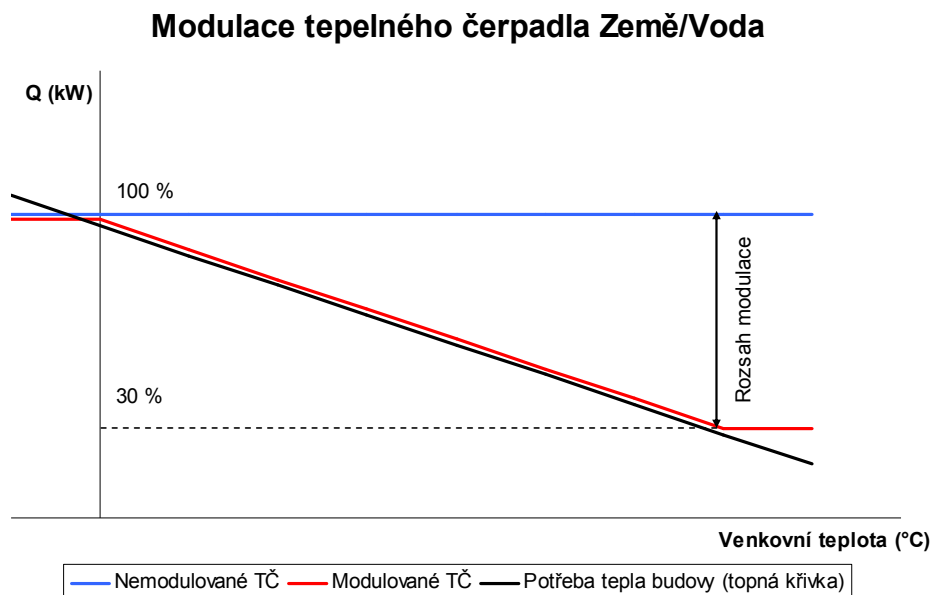
Kompresor typu Scroll je dnes nejužívanější typ, protože je jejím dosaženo vyššího topného faktoru než u jiných kompresoru s modulací výkonu.

3.3.1. Chladivo

Jako chladivo v okruhu tepelného čerpadla se dnes již běžně užívají směsi látek, které neobsahují freony, jsou nejedovaté, nehořlavé a jsou šetrné vůči životnímu prostředí. Označení používaných chladiv je například R 407C, R 410 A, R 404 a další. Některá jsou směsí i více látek pro dosažení co nejlepších fyzikálních vlastností. [8]

3.4. Modulace výkonu tepelného čerpadla

Potřeba tepla v domě během roku kolísá, tedy není konstantní. Tomuto kolísání potřebujeme i přizpůsobit dodávku tepla, která by měla pokrývat přesně jeho potřebu. Tepelné čerpadlo s konstantním výkonem reguluje potřebu tepla způsobem start/stop, ale právě modulací výkonu se zamezí častým startům tepelného čerpadla a prodlužuje se jeho životnost. [5]

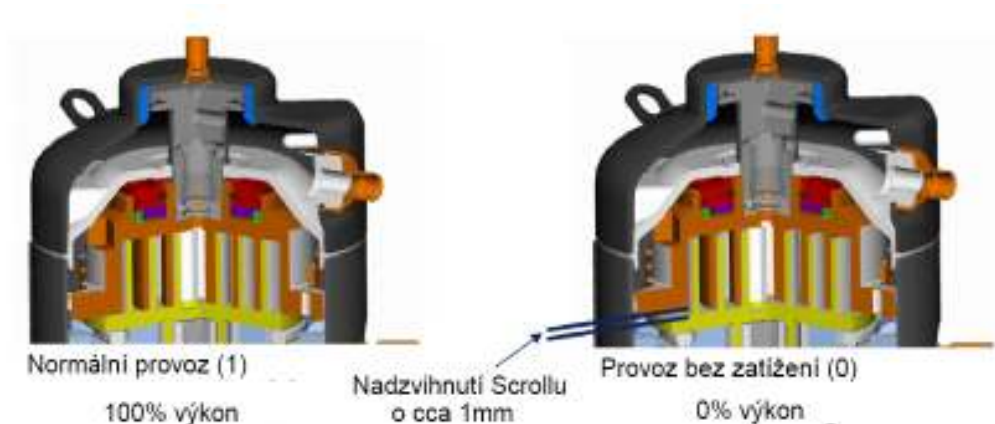


Obr. 5 Znázornění důvodu použití modulace výkonu tepelného čerpadla. [5]

Na Obr. 5 je znázorněna možnost a výhoda modulace výkonu tepelného čerpadla země/voda. Modrá křivka značí nemodulované tepelné čerpadlo (země/voda), které má konstantní výkon, zatímco modulované tepelné čerpadlo (červená křivka) přesně kopíruje potřebu tepla budovy během celého roku (černá křivka).

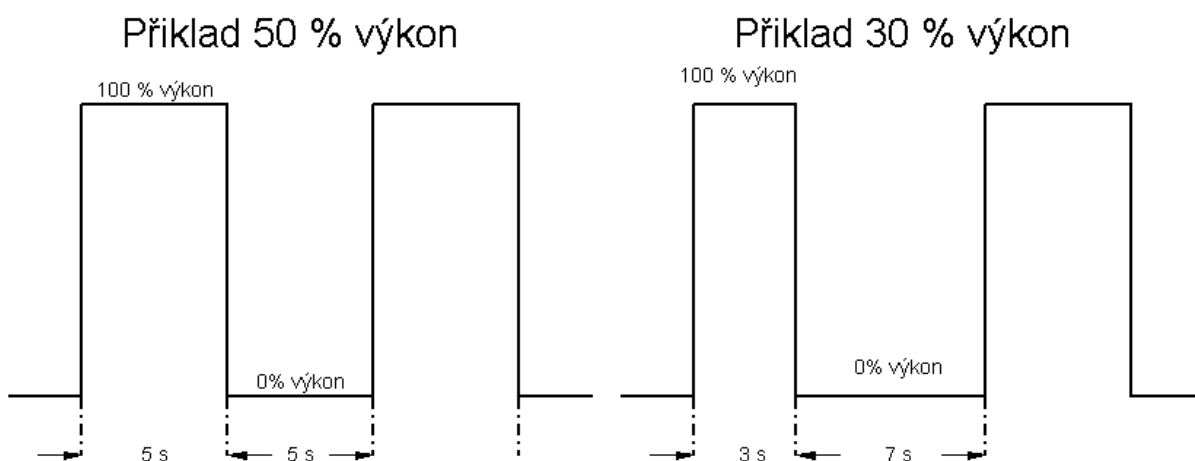
3.4.1. Princip modulace

Prvním způsobem regulace výkonu tepelného čerpadla bylo užití frekvenčního měniče, který měnil otáčky motoru pohánějící kompresor, ale při změně otáček motoru klesá jeho účinnost, což se projevuje zvýšením provozních nákladů. Druhá možnost regulace výkonu je přímo v tepelném čerpadle, pomocí kompresoru Digital Scroll s pulsní modulací. Stlačení chladiva v kompresoru zajišťují dvě spirály (Scroll), které se po nasátí chladiva uzavřou a stlačují chladivo na požadovaný tlak (Obr. 4). Chladivo je poté na výstupu vytlačeno a proces se opakuje. Toto je proces se 100% výkonem. Abychom dosáhli 0% výkonu, je možné spirály (Scroll) nadzdvihnout přibližně o 1mm, čímž dosáhneme provozu bez zatížení a tedy nulového výkonu (Obr. 6).



Obr. 6 Provoz kompresoru s plným zatížením a bez zatížení. [5]

Plynulá změna výkonu je poté dána skládáním těchto měnících se stavů, nebo-li pulsů. Například pro dosažení 50% výkonu tepelného čerpadla probíhá normální provoz na 100% po dobu 5s a provoz bez zatížení také 5s. Následným složením těchto stavů se dosáhne požadovaného výstupního výkonu, jak ukazuje Obr. 7. Tímto způsobem lze regulovat výkon tepelného čerpadla v rozsahu 30-100%.



Obr. 7 Příklad složení signálu při modulaci výkonu tepelného čerpadla. [5]

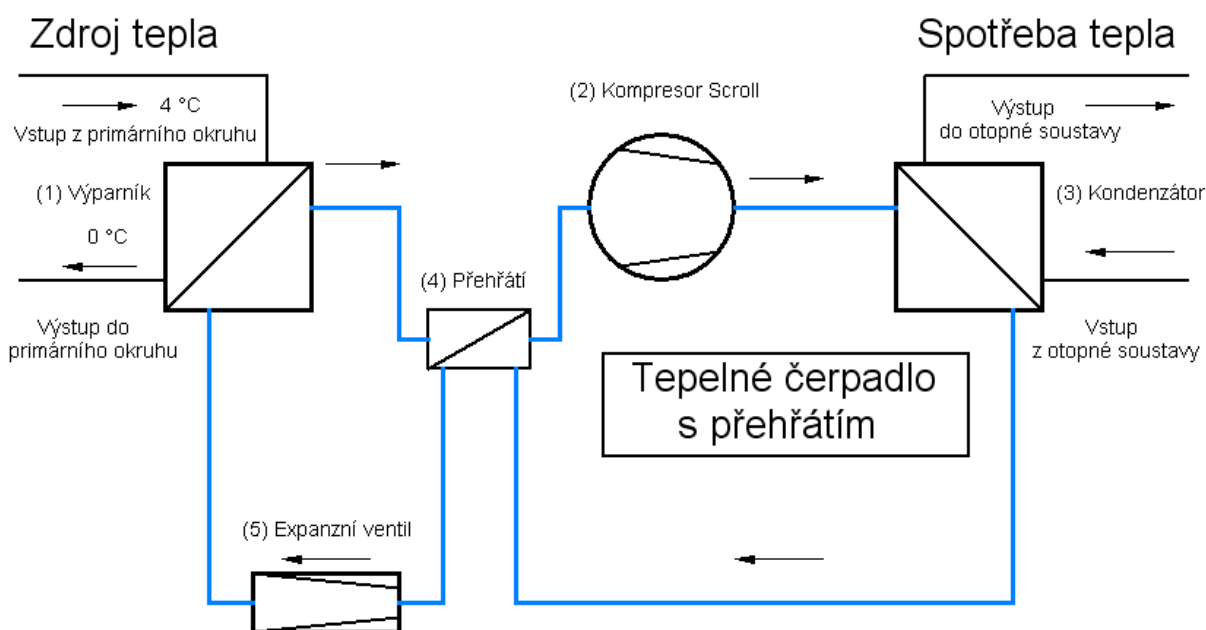
Regulací výkonu pomocí kompresoru Digital scroll lze dosáhnout vyšších topných faktorů, než při užití frekvenčního měniče, a to díky nižšímu příkonu kompresoru při stlačování bez zatížení.

3.5. Rozšířené funkční zapojení tepelného čerpadla

Dnes se již používají i systémy, kde se využívá výstupního chladiva z kondenzátoru pro přehřívání chladiva vstupujícího do kompresoru, aby bylo dosaženo vyšší teploty výstupní vody. Další způsob je přímé vstřikování chladiva do kompresoru.

3.5.1. Systém s přehřátím

Na Obr. 8 je zapojení, při kterém se využívá právě přehřátí chladiva vstupujícího do kompresoru. Ve výměníku (4) je odebrána část energie chladiva jdoucího z kondenzátoru, díky tomu je zvýšena teplota chladiva vstupujícího do kompresoru a při stejném tlaku je možno dosáhnout vyšší teploty při stlačení a následně lze docílit výstupní vody o teplotě až 60 °C. [5],[8]

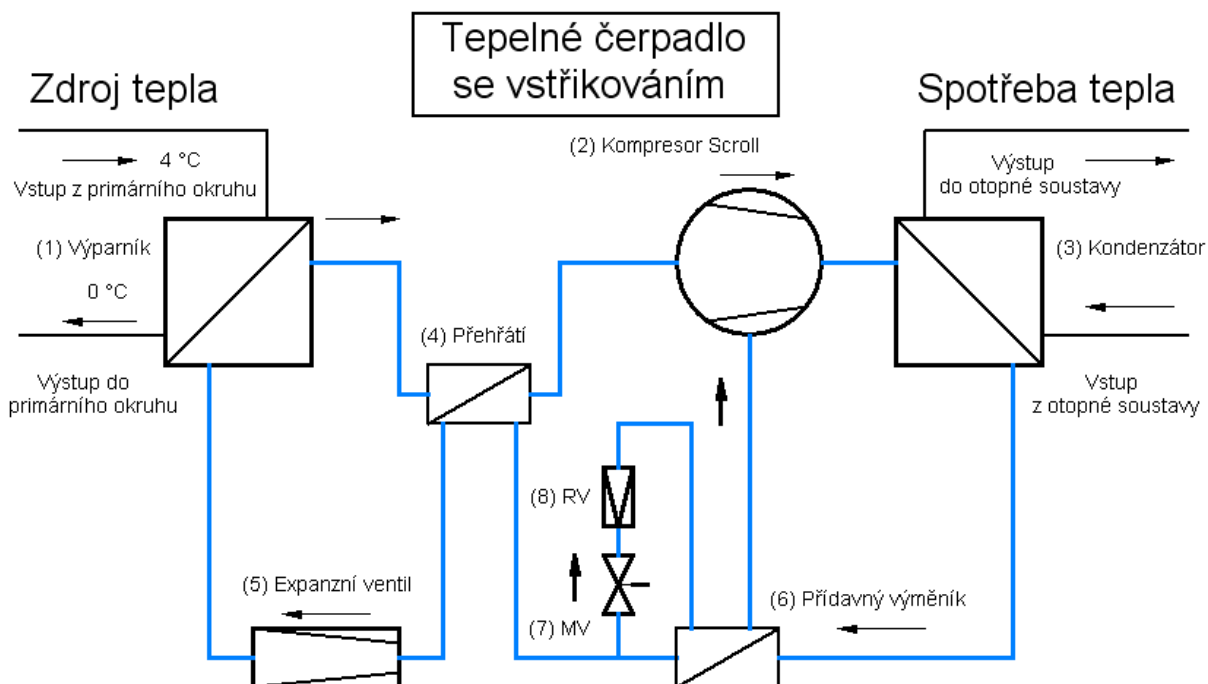


Obr. 8 Přehřívání vstupního média do kompresoru pro dosažení vyšších výstupních teplot.

3.5.2. Systém se vstřikováním do kompresoru

Další možnost zapojení je na Obr. 9, kde je možné dosáhnout teploty výstupní vody až 65 °C. Toho je dosaženo pomocí vstřikování pracovního média přímo do kompresoru. Za kondenzátorem je magnetický ventil (MV), přes který se vyčlení potřebné pracovní médium pro vstřikování. Pracovní látka je tekutá, ale stále pod vysokým tlakem, a proto se v redukčním ventilu (RV) přizpůsobí na vstřikovací tlak a ve vloženém výparníku tepla se odpaří. V tomto výparníku tedy nastane přeměna pracovní látky na páru, ta je poté vstřikována přímo do procesu komprese. Pracovní látka, která se již nachází v kompresoru, se vlivem vstřikování ochladí a dojde k poklesu tlaku, který je však vyrovnáván úměrným množstvím vstřikované pracovní látky. Jelikož je látka nyní v kompresoru chladnější, může být provedena větší komprese. Na konci tohoto procesu je tedy dosaženo většího tlaku, aniž by se udržovaly neúnosně vysoké teploty, jak by tomu bylo u kompresoru bez

vstřikování. Tímto způsobem lze dosáhnout teploty topné vody až 65 °C a u ohřevu pitné vody až 58 °C. Díky tomu lze dimenzovat otopnou soustavu i na vyšší teplotní spády. [5],[8]



Obr. 9 Funkční schéma tepelného čerpadla se vstřikováním do kompresoru [5].

Tento systém lze především využít při rekonstrukcích, aby nebylo nutné měnit otopnou soustavu. Nebo také pro dosažení komfortu při přípravě teplé užitkové vody.

3.6. Způsob provozu tepelného čerpadla

Tepelná čerpadla lze provozovat v různých režimech. Při volbě provozního režimu rozhodují místní podmínky a také typ zvoleného tepelného čerpadla.

3.6.1. Monovalentní provoz

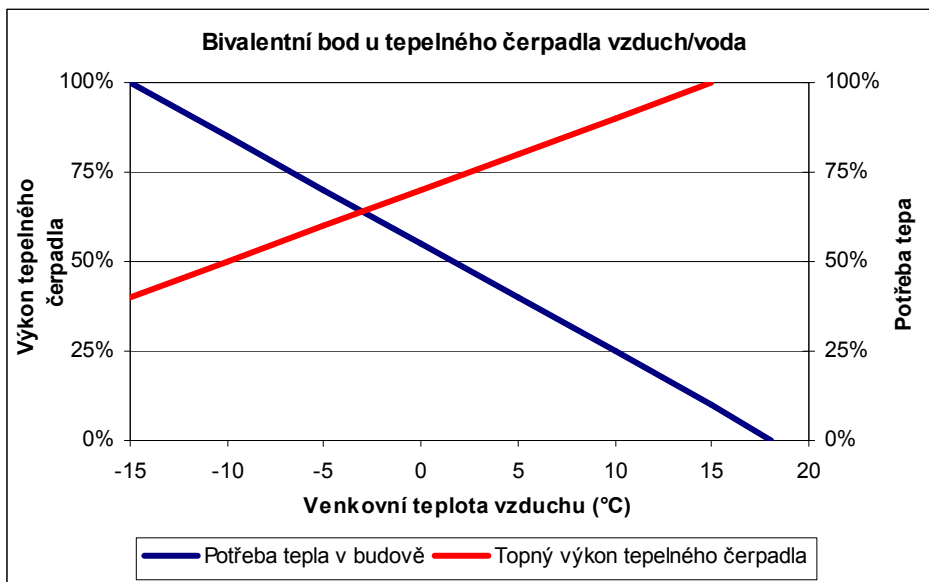
Tepelné čerpadlo je dimenzováno na 100% tepelných ztrát objektu. Po celé topné období zajišťuje vytápění a případně i ohřev teplé užitkové vody. Žádný další zdroj tepla není potřeba. Tento způsob se užívá především u tepelných čerpadel typu země/voda a voda/voda.

3.6.2. Monoenergetický provoz

Tepelné čerpadlo je při tomto způsobu provozu dimenzováno na 70 až 85 % potřeby tepla budovy. Systém je doplněn elektrickým ohřevem. Pokyn k připojení elektrického zdroje je dán ekvitermní regulací v závislosti na venkovní teplotě a tepelné zátěži. Tento způsob provozu je vhodný kompromis mezi čistě monovalentním a bivalentním způsobem provozu.[2]

3.6.3. Bivalentní paralelní provoz

Tepelné čerpadlo je dimenzováno na výkon do 70% tepelných ztrát objektu. Po dosažení tzv. bivalentního bodu regulace připojí k tepelnému čerpadlu doplňkový zdroj tepla, jako například průtokový ohřívač či plynový kotel a oba zdroje se podílejí na dodávání tepla společně.[5]



Obr. 10 Průsečík určující bivalentní bod pro tepelné čerpadlo vzduch/voda.

Bivalentní bod je u vzduchových tepelných čerpadel v rozmezí -3 až -7 °C. U typu země/voda, pokud je dimenzováno na bivalentní provoz, je tento bod v rozmezí -5 až -8 °C.[3]

3.6.4. Bivalentní alternativní provoz

Tepelné čerpadlo pokrývá veškerou tepelnou potřebu objektu až do bivalentního bodu (Obr. 10). Při překročení této teploty regulace vypíná tepelné čerpadlo a druhý zdroj tepla, jako například kotel na zemní plyn, přebírá plnou tepelnou ztrátu budovy. Bivalentní provoz, ať už paralelní nebo alternativní, je vždy používán u tepelných čerpadel vzduch/voda.[2],[5]

3.7. Typy tepelných čerpadel

Rozdělení tepelných čerpadel je především podle typu ochlazované látky a druhu ohřívajícího média. Z toho vyplývá možnost provozu a použití těchto typů tepelných čerpadel.

3.7.1. Vzduch/voda

Typ tepelného čerpadla vzduch/voda vyniká především snadnou instalací, prakticky kdekoli a na jakýkoliv objekt. U tohoto typu odpadají prakticky jakékoliv zemní práce, díky tomu jsou i nižší pořizovací náklady. Výkon tepelného čerpadla se mění výrazně s teplotou vzduchu a s obsahem vlhkosti, proto se vždy provozují v bivalentním provozu. Tepelná čerpadla vzduch/voda jsou schopna pracovat do teploty -15 °C, ale lze se setkat i s pracujícími do -20 °C. Proto se tento typ neuvádí

například v horských oblastech, kde panují dlouho nízké teploty. Přídavný zdroj tepla by musel být v provozu častěji a náklady na provoz by značně narostly.

Provedení je buď jako venkovní jednotka, která je umístěná mimo objekt, kde nasává vzduch, a nebo jako vnitřní jednotka, která přes izolované potrubí nasává venkovní vzduch. Množství protékajícího vzduchu je řádově tisíce m³/h. Jednotka nasávající vzduch je vybavena ventilátorem, který produkuje hluk, jehož hodnota se pohybuje pod 40 dB. Proto je nutné brát toto v úvahu, při umístění venkovní jednotky. [3],[4]

3.7.2. Nemrznoucí směs/voda

Jedná se o typ tepelného čerpadla země/voda, který je univerzálním typem pro teplovodní vytápění. Velká výhoda tohoto druhu tepelného čerpadla, kde je nejčastěji zdrojem tepla zemní kolektor nebo geotermální vrt, je jeho stabilita, protože není prakticky závislý na venkovních klimatických podmínkách. Díky tomu je lze dimenzovat pro monovalentní způsob vytápění a také pro celoroční ohřev teplé užitkové vody

Stabilita provozu je zatížena prvotní nutností větší investice do zemních prací, která je především u geotermálních vrtů vysoká.

Tato tepelná čerpadla mají stabilní výkony, dobré úspory a dlouhou životnost. Díky nezávislosti na klimatických podmínkách lze tento systém využít prakticky kdekoli, i v horských oblastech, kde je venkovní teplota dlouhodobě velmi nízká. [3],[4]

3.7.3. Voda/voda

Využívá se především systém, který čerpá podzemní vodu. Systémy využívající povrchovou vodu se užívají jen zřídka.

Díky čerpání podzemní vody, která má od hloubky 10m prakticky stabilní teplotu okolo 10 °C, je dosaženo největšího chladícího výkonu. Pokud je zdroj podzemní vody dostatečně vydatný je možné ho provozovat v monovalentním provozu i celoročně k ohřevu teplé užitkové vody. Díky vysoké teplotě vstupní energie lze dosáhnout vysokých výstupních teplot při dobrém topném faktoru. Proto je topný okruh nejčastěji volen jako teplovodní ústřední vytápění.

Nutnost čerpání vody se projevuje do provozních nákladů, protože odebíraný výkon čerpadla primárního okruhu není zanedbatelný. [3],[4].

3.7.4. Voda nebo vzduch/vzduch

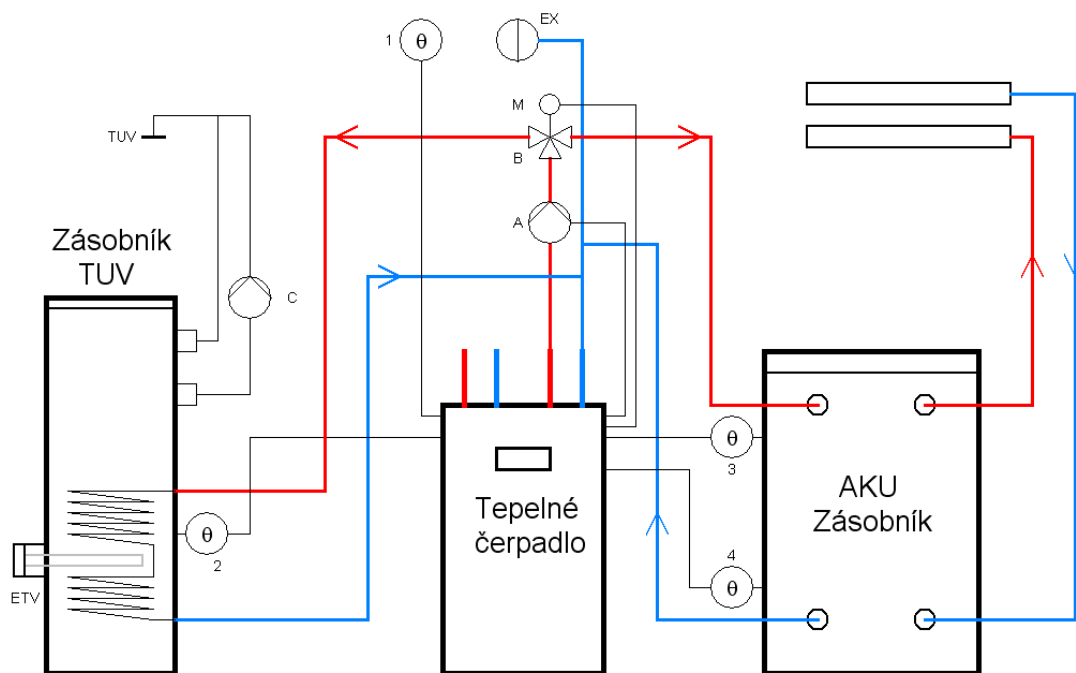
Princip získávání venkovní energie je stejný jako u tepelných čerpadel vzduch/voda, respektive voda/voda. Jen topný okruh je nahrazen teplovzdušným vytápěním a topný výkon je předáván vnitřnímu vzduchu pomocí výustek v jednotlivých místnostech. Nutnost jsou ventilátory pro rozvod a filtraci vzduchu. Je nutné zajistit dostatečnou výměnu vzduchu. Typ vzduch/vzduch se užívá jako doplňkový zdroj tepla. Systém voda/vzduch je možno provozovat v monovalentním provozu jako plnohodnotný vytápěcí systém. Náklady na investici jsou celkově nižší než při instalaci teplovodního systému vytápění. Ventilátory nasávací jednotky tepelného čerpadla vzduch/vzduch, i ventilátory rozvádějící vzduch uvnitř objektu, produkují určitou úroveň hluku, takže je nutno toto brát v úvahu při instalaci tepelného čerpadla. [3],[4]

3.8. Soustava tepelného čerpadla

Samotné tepelné čerpadlo je v celé funkční soustavě pro vytápění nejdůležitějším prvkem, ale ne jediným. Do tepelného čerpadla je přívod venkovní energie proveden pomocí tzv. primárního okruhu. Výstup z tepelného čerpadla je přes směšovací ventil do akumulčního zásobníku, který je dále napojen na otopnou soustavu, a také do zásobníku na teplou užitkovou vodu. Nedílnou součástí celé soustavy jsou oběhová čerpadla, která jsou zvláště důležitá u nízkoteplotních otopných soustav.

3.8.1. Zapojení soustavy tepelného čerpadla

Způsob zapojení tepelného čerpadla je odlišné pro každý typ tepelného čerpadla. Příklad hydraulického zapojení soustavy tepelného čerpadla je na Obr. 11. Jedná se o systém pro vytápění a ohřev teplé vody, který je také doplněn akumulčním zásobníkem. Zapojení může být variabilní podle požadavků na funkce systému. Tepelné čerpadlo lze využít v kombinaci, jak pro vytápění, ohřev teplé užitkové vody, ohřev bazénu, tak i pro zapojení se solárními panely nebo v zapojení pro letní chlazení domu.



Obr. 11 Příklad funkční zapojení soustavy tepelného čerpadla s akumulčním zásobníkem a s ohřevem teplé užitkové vody.

- A* Oběhové čerpadlo,
- B* 3cestný ventil,
- C* Cirkulační čerpadlo pro rozvod teplé užitkové vody,
- EX* Expanzní nádoba,
- ETV* Elektrická topná vložka pro dohřev teplé užitkové vody,
- 1* Čidlo snímající venkovní teplotu,
- 2,3,4* Čidla pro snímání teploty v zásobníku pro teplou užitkovou vodu a v akumulčním zásobníku.

3.8.2. Akumulace

Aby tepelné čerpadlo mohlo pracovat v kontinuálním provozu, je doplněno akumulacním zásobníkem, který je dobíjen při nízké potřebě tepla, aby se zamezilo častému spínání kompresoru. Toto akumulované teplo se využívá v dalších dnech pro vytápění nebo pro přípravu teplé užitkové vody. Velikost zásobníku se volí v rozmezí 20-25 litrů na 1kW jmenovitého tepelného výkonu tepelného čerpadla. Dimenzování akumulčního zásobníku pro optimalizaci doby chodu se tedy provádí podle rovnice:[2],[3]

$$V_{AZ} = Q \cdot V_A \quad (l, kW, l) \quad (5)$$

V_{AZ} objem akumulčního zásobníku pro topnou vodu (l),
 Q jmenovitý tepelný výkon tepelného čerpadla (kW),
 V_A hodnota potřebného objemu na 1kW výkonu. (20-25 l).

3.8.3. Ohřev teplé užitkové vody

Pro ohřev teplé užitkové vody (TUV) jsou odlišné požadavky než pro vytápění, jelikož potřeba pitné vody je každý den v roce téměř stejná, zatímco potřeba tepla pro vytápění se mění podle klimatických podmínek. U klasických tepelných čerpadel země/voda a voda/voda lze v zásobníku teplé vody dosáhnout teploty max.. 45 °C. Pro dosažení teploty nad 45 °C musí být zásobník vybaven například elektrickou topnou spirálou nebo použitím tepelného čerpadla se vstřikováním do kompresoru, pro dosažení teploty až 58 °C.

Ohřev vody by měl probíhat především v nočních hodinách, kdy požadavek na vytápění je nižší. Pro ohřev teplé vody je tedy vhodné navýšit výkon tepelného čerpadla podle rovnice (6), a to o 0,2 kW na osobu.[2],[3]

$$Q_{CV} = Q + 0,2 \cdot i \quad (kW, kW, -) \quad (6)$$

Q_{CV} požadovaný výkon tepelného čerpadla s přírážkou na ohřev TUV (kW),
 Q požadovaný topný výkon pro vytápění (kW),
 i počet osob (-).

Při navýšení výkonu tepelného čerpadla je nutné také správně navrhnout velikost primárního okruhu a výměníku tepla.

3.8.4. Ohřev bazénu

Tepelná čerpadla lze využít dále také pro ohřev bazénu, a to jak vnitřního nebo venkovního. Ohřev se provádí přes bazénový výměník tepla. Tepelné čerpadlo je napojeno na výměník přes 3cestný směšovací ventil, takže při požadavku na ohřev vody v bazénu regulace tepelného čerpadla přepne ventil a ohřev probíhá až do požadované teploty. Při návrhu tepelného čerpadla je nutné počítat s vyšším topným výkonem a tomu také případně přizpůsobit primární okruh.[2]

3.8.5. Chlazení

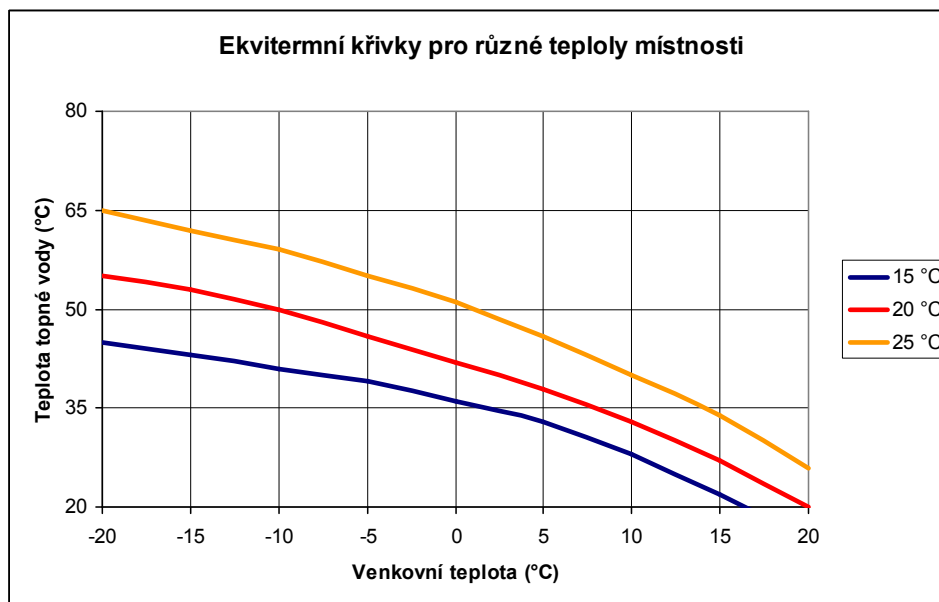
Tepelná čerpadla lze využít i pro chlazení objektu během horkých dnů. U tepelných čerpadel využívající vrty či půdní kolektory, je možné využít tzv. pasivní chlazení, kdy přebytečné teplo z objektu je vráceno, například přes podlahové vytápění zpět do země a přispívá k regeneraci vrtu či půdy. Pro tento způsob je nutno uskutečnit zapojení celého systému, při němž se tepelné čerpadlo vlastního chlazení neúčastní. Tepelná čerpadla vzduch/voda nebo vzduchu/vzduch jsou většinou schopna pracovat v tzv. reverzním chodu, který je například využíván pro odmrazování výparníku během topného období. Tento způsob chodu lze tudíž využít v letních měsících k odvádění přebytečného tepla do okolního vzduchu.[3],[4]

3.9. Ekvitermní regulace tepelného čerpadla

Ekvitermní regulace teploty v místnosti spočívá v nastavení zdroje tepla a jím dodávané topné vody, v závislosti na změně venkovní teploty. Při klesající venkovní teplotě je nutno zvýšit teplotu topné vody, aby byla dosažena rovnováha mezi dodaným teplem a ztrátami, a teplota v místnosti zůstala konstantní.

3.9.1. Ekvitermní křivky

Pro správnou funkci ekvitermní regulace je nutné stanovit pro každou místnost ekvitermní křivky. Ty popisují vzájemnou závislost topné vody, místnosti a venkovní teploty. Podle požadované teploty v místnosti se určí křivka a podle venkovní teploty je poté regulována teplota topné vody (Obr. 12).



Obr. 12 Ekvitermní křivky.[10]

Tedy pro určení ekvitermních křivek je důležitá požadovaná teplota místnosti a také nejnižší dosažitelná venkovní teplota. Takto získané ekvitermní křivky jsou poté nastaveny v ekvitermním regulátoru.[10]

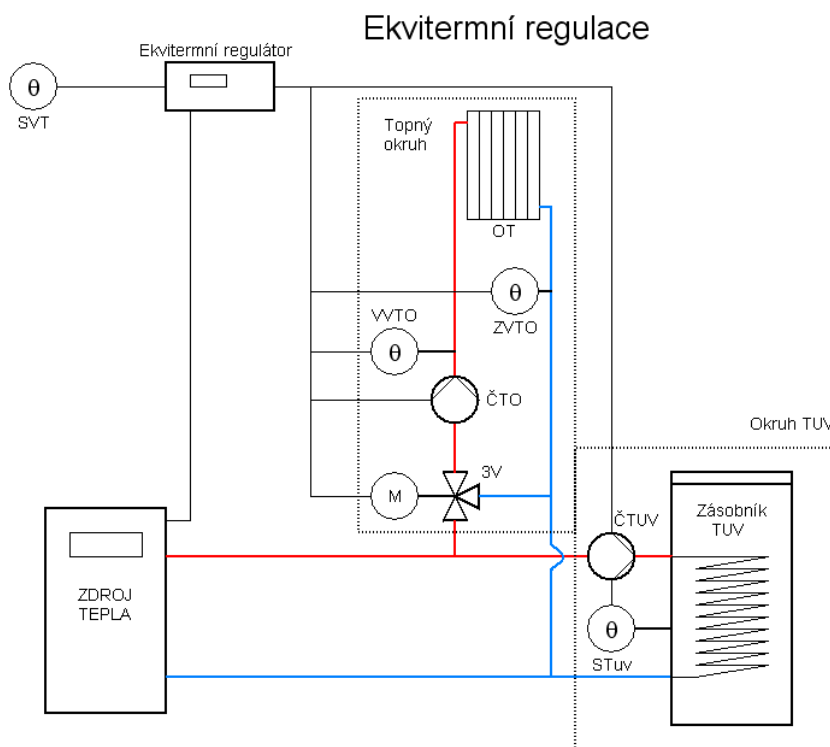
3.9.2. Ekvitermní regulátor

Základní princip regulátoru je změna teploty topné vody podle aktuální venkovní teploty a podle zvolené ekvitermní křivky. Tyto křivky má regulátor uložené v paměti a uživatel může podle potřeby měnit druh křivky či dokonce sklon pro dosažení optimální tepelné pohody. Díky tomu, že do otopných těles je přiváděná opravdu jen momentálně potřebná teplota, nedochází k přetápění a provoz je hospodárnější.

Ekvitermní regulátor může poskytovat i další funkce, jako je možnost ovládání solárního ohřevu, možnost připínání a odpínání dalšího zdroje tepla pro vytápění, ovládání ohřevu teplé užitkové vody dalším zdrojem či ovládání systému chlazení u tepelných čerpadel.[5],[10]

3.9.3. Zapojení ekvitermní regulace

Na Obr. 13, je možnost zapojení ekvitermní regulace, která ovládá zdroj tepla, topný okruh a okruh pro ohřev teplé užitkové vody.



Obr. 13 Příklad funkčního zapojení ekvitermní regulace.

Ekvitermní regulátor nastavuje teplotu topné vody ve zdroji tepla podle venkovní teploty, kterou snímá venkovní čidlo (SVT). Dále také regulace ovládá čerpadlo topného okruhu (ČTO) a 3cestný směšovací ventil (3V), který je řízen podle teploty topné vody vstupující a vystupující z otopného tělesa. Teplota topné vody je snímána čidly (VVTO a ZVTO). Pokud je rozdíl teplot malý, je směšovací ventil přivřen, čímž dojde ke zmenšení průtoku topné vody. Je-li naopak rozdíl velký, je ventil pootevřen a dodávka topné vody je zvětšena. Tímto mechanismem je zaručen hospodárný chod otopného tělesa. Aby bylo dosaženo kontroly, že tělesa dostatečně vytopí danou místnost na požadovanou teplotu, je v ní v místnosti umístěn snímač teploty, který je vlastně zpětnou vazbou a je tedy zaručena optimální tepelná pohoda.[10]

4. Zásady návrhu primárních okruhů

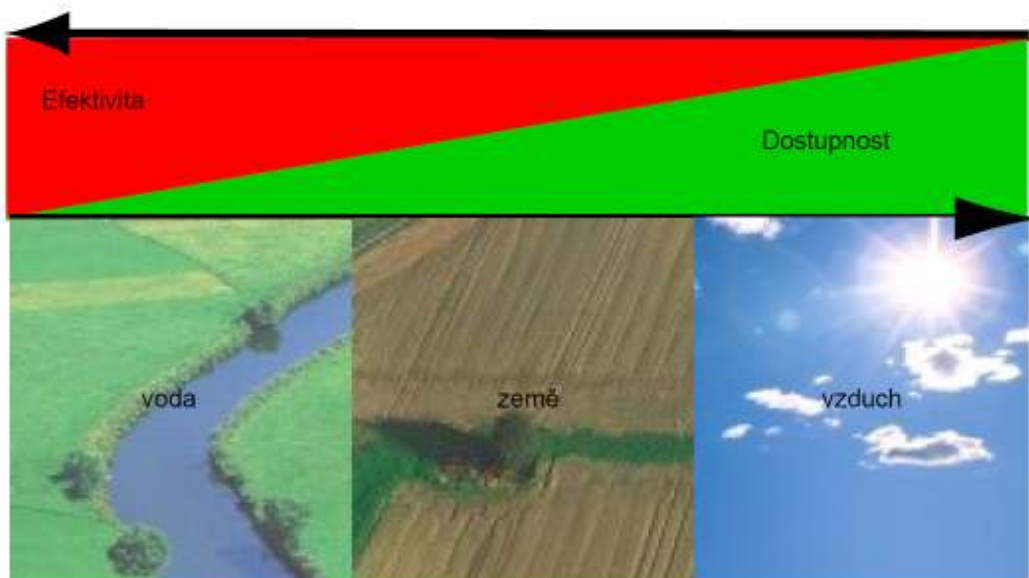
Primární okruh je zařízení odebírající energii venkovnímu prostředí. Vždy je nutné správné navržení tohoto okruhu pro jeho správnou a stabilní funkci.

4.1. Zdroje nízkopotenciálního tepla

Možnosti odběru tepla pro TČ.

- Ze země
 - zemní plošný kolektor
 - geotermální vrty
 - energetické piloty
- Z vody
 - spodní voda
 - povrchová voda
 - odpadní voda
- Ze vzduchu
 - venkovní vzduch
 - odpadní vzduch
- Kombinace uvedených způsobů

Dostupnost zdrojů nízkopotenciální energie jde proti jejich efektivitě. Vzduch je všude kolem nás, ale při nižších venkovních teplotách velmi klesá efektivita a celkově je topný faktor nižší, než u ostatních zdrojů, zatímco u země je dosahováno vyšších topných faktorů a dostupnost je velmi dobrá. U vody jako nízkopotenciálního zdroje je dostupnost velmi omezená, ale zároveň je dosaženo nejvyšších topných faktorů. Tedy způsoby, které jsou provozně nejhospodárnější jsou zároveň nejméně dostupné a naopak. [3],[5]



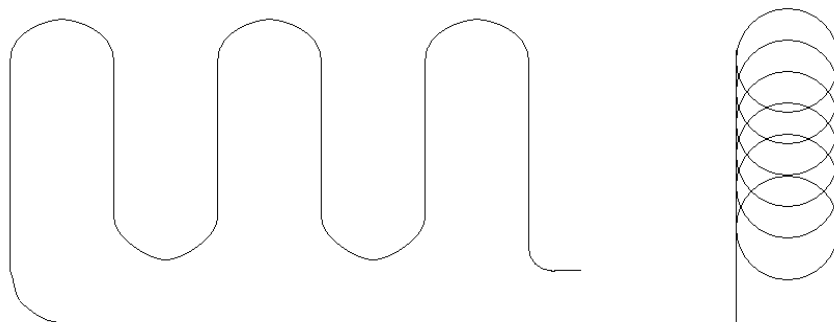
Obr. 14 Dostupnost a efektivita zdrojů nízkopotenciálního tepla. [5]

4.2. Zemní plošný kolektor

Technologicky se pracuje s energií slunce, která se v letních obdobích ve formě tepla akumuluje do vrchních vrstev půdy a v topném období tuto energii odebíráme pro tepelné čerpadlo. Podmínka pro realizaci tohoto způsobu je dostatečně velký prostor na uložení primárního okruhu.[3]

4.2.1. Způsob uložení

Kolektor nebo také primární okruh je potrubí z polyethylenu a ukládá se do nezamrzající hloubky 1,5-2 m. Na položené potrubí je nanášena vrstva písku přibližně 5cm tlustá. Půdě je poté odebíráno teplo tímto potrubím, kterým proudí nemrznoucí směs. Potrubí je od sebe vzdáleno minimálně 0,6m, ale doporučuje se 1m. Dále se doporučuje umístit kolektor minimálně 1,5m od základů budov, aby nedošlo k jejich promrznutí. Jednotlivé smyčky primárního okruhu by neměly být delší než 100m, a to kvůli snížení tlakových ztrát. Nejčastější způsob uložení je na Obr. 15. Jedná se o klasické uložení, které rovnoměrně čerpá energii z plochy.[3],[4]



Obr. 15 Klasické uložení potrubí zemního kolektoru vlevo a vpravo uložení tzv. slinky [3].

Další možností je využití způsobu kolektoru tzv. slinky, která je tvořena smyčkami potrubí, které vzniknou roztahením svinutého kola hadice. Toto zapojení je vhodné tam, kde je omezen prostor pro pokládku zemního kolektoru.

4.2.2. Dimenzování kolektoru a odběr tepla

Pro správný návrh kolektoru je nutné znát termické vlastnosti půdy. Teplota v půdní vrstvě se během zimního období mění podle průměrné venkovní teploty, a proto se topný faktor také mírně mění. Nejhorší topný faktor je na konci topné sezony, kdy už je půda vychlazená. Velikost kolektoru se určuje také podle toho, na jaký účel je tepelné čerpadlo využito. Pokud jen pro vytápění, pak může být velikost menší, protože přes léto dochází k regeneraci půdní vrstvy a to slunečním zářením, přestupem tepla z okolních vrstev půdy a prouděním okolního vzduchu. Při provozu čerpadla celoročně (např. pro ohřev teplé užitkové vody) je nutné plochu zemního kolektoru zvětšit. Během teplých letních dnů je možno teplo do kolektoru vracet, tím vlastně dům chladit a zároveň napomáhat regeneraci půdy pro další topnou sezonu. Energetické zisky z půdní vrstvy při provozu čerpadla se pohybují v rozmezí 10-40 W/m² podle druhu a složení zeminy, jak ukazuje Tab. 3.[3],[4],[5]

Tab. 3 Odběrové výkony pro různé druhy půdy dle [2],[4].

Druh půdy	Měrný výkon z půdy q_E [W/m ²]
Suchá písčitá	10-15
Vlhká písčitá	15-20
Suchá jílovitá	20-25
Vlhká jílovitá	25-30
Vedoucí spodní vodu	30-40

Podle těchto hodnot, a tzv. chladicího výkonu, se určí potřebná plocha zemního kolektoru. Chladicí výkon Q_K je rozdíl mezi tepelným výkonem a elektrickým příkonem tepelného čerpadla,

$$Q_K = Q - E \quad (kW; kW; kW) \quad (7)$$

Potřebná plocha S_K pro zemní kolektor se následně určí podle ,

$$S_K = \frac{Q_K}{q_E} \quad (m^2; W; W \cdot m^{-2}) \quad (8)$$

Počet primárních okruhů n_O o délce 100 m se určí podle potřebné plochy pro zemní kolektor,

$$n_O = \frac{S_K \cdot k}{100} \quad (-; m^2, m^{-2}) \quad (9)$$

Hodnota k se určí podle typu použité trubky v primárním okruhu tak, aby byly dodrženy minimální odstupy, počet trubek a odebírán konstantní výkon.(Tab. 4).

Tab. 4 Instalační vzdálenosti pro daný typ trubky. [2]

Typ PE-trubky (mm)	min. vzdálenost trubek (m)	k (délka trubek na/m ²)	Objem (l/m)
20x2,0	0,33	3	0,201
25x2,3	0,50	2	0,327
32x2,9	0,70	1,5	0,531

Množství teplotnosného média v zemním kolektoru a přívodním potrubí pro délku primárního okruhu 100m se určí podle rovnice (10). Přívodní potrubí je nutno dimenzovat větší.

$$V_K = n_O \cdot 100 \cdot V_P + l_P \cdot V_P \quad (l, m, l) \quad (10)$$

- V_K Objem teplotnosného média v zemním kolektoru (l),
 l_S Délka sondy (dvojitá U-sonda) (m),
 n_O Počet primárních okruhů (-),
 V_P Měrný objem potrubí (l.m⁻¹),
 l_P Délka přívodního potrubí (m).

Pokud je počet primárních okruhů více než jeden, je nutno použít sběrnou jímku, kde jsou všechny okruhy napojeny na přívodní potrubí k tepelnému čerpadlu. Poté je nutno přívodní potrubí dimenzovat větší, aby byl zachován dostatečný přenos energie.

4.3. Geotermální vertikální sondy

Jedná se o spolehlivý zdroj energie pro tepelné čerpadlo. Je to alternativa při nedostatku místa pro zemní plošný kolektor. Záběr plochy na povrchu je minimální, dosahuje se stabilního a vyššího topného faktoru po celé topné období, ale jedná se o finančně náročnější investici oproti zemnímu kolektoru.

4.3.1. Podmínky zhotovení

Vrt je považován za vodní dílo, i když se z něj voda nečerpá. Provedení musí povolit příslušný stavební úřad, který obvykle vyžaduje hydrogeologický posudek dané lokality a dále je nutno práce ohlásit 8 dní předem na příslušný báňský úřad.[7]

4.3.2. Dimenzování vrtu

Pro určení potřebné délky vrtu je směrodatná tepelná vodivost hornin, která se z hloubkou a složením půdní vrstvy mění. Nejméně energeticky přínosných je prvních 10 m vrtu a od této hloubky není už teplota země ovlivněna klimatickými podmínkami na povrchu. Tedy vlastní délka vrtu se dimenzuje až od 10m hloubky, někdy dokonce až od 30m.

Výkonový zisk je o to větší, čím více vlhkosti půda obsahuje, poněvadž s přibývajícím hloubkou se zvyšuje obsah vlhkosti nebo se nachází spodní voda, tím se energetický zisk zvyšuje. Hodnoty pro jednotlivé typy půdy uvádí Tab. 5. [4],[6],[7]

Tab. 5 Hodnoty měrného výkonu pro různé druhy půdy. [5]

Druh půdy	Měrný výkon (W/m)
suchá písčitá	20-40
vlhká jílovitá	50-60
vrstvy se spodní vodou	70-90

V České Republice se v praxi při dimenzování užívá hodnota měrného výkonu získaného z jednoho metru vrtu $q_E=50$ W/m. Výjimku tvoří některé oblasti jako jsou Opavsko, Olomoucko a okolí Českých Budějovic, kde je sušší podloží a měrný výkon je jen přibližně $q_E=40$ W/m. Ale jsou i oblasti z vyššími energetickými zisky jako jsou Krkonoše, kde je žulové podloží, a dá se dimenzovat podle $q_E=60$ W/m. Pokud chce mít investor přesný pojem složení podloží lze provést tzv. Thermal Response Test, který zjistí tepelnou odezvu podloží a umožňuje vytvoření jeho 3D modelů. Ty umožní simulovat ochlazování zeminy pro určení nejlepšího umístění vrtu. Tento test se především užívá při větších projektech, kdy se zhotovuje více vrtů a je třeba znát jejich možné vzájemné ovlivňování.[6]

Dále je vždy k dobru délku vrtu záměrně předimenzovat o 10%. Tím se pro daný potřebný výkon získá rezerva, která eliminuje případné slabší výkonové zisky v některé části podloží a získá se jistota správné funkčnosti vrtu a celého systému. Návrh se opět dělá podle tzv. chladicího výkonu Q_K tepelného čerpadla. Při budování více vrtů je důležité, aby vzdálenost vrtů od sebe byla aspoň 7,5m (doporučuje se 10m), aby nedocházelo ke vzájemnému ovlivnění. Délka vrtu je poté dána podle: [2],[6],[7]

$$l_s = 1,1 \cdot \frac{Q_K}{q_s} \quad (m, W, W \cdot m^{-1}) \quad (11)$$

$$V_m = 2 \cdot l_s \cdot 2 \cdot V_p + l_p \cdot V_p \quad (l, m, l) \quad (12)$$

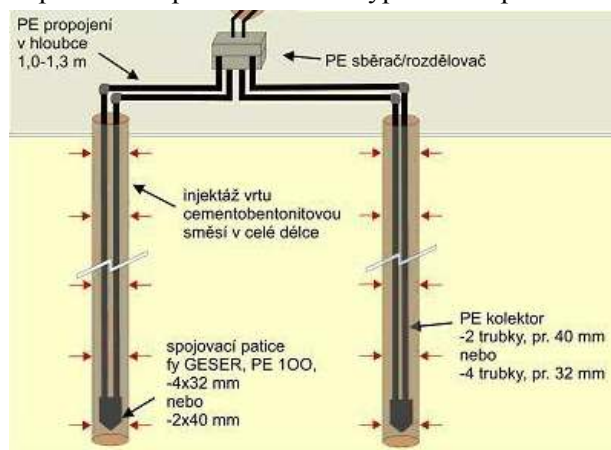
l_s	Délka sondy (dvojitá U-sonda) (m),
Q_K	Chladicí výkon tepelného čerpadla (W),
q_s	Měrný odběrný výkon vrtu ($W \cdot m^{-1}$),
V_m	Objem teplotnosného média v sondě (l),
V_p	Měrný objem potrubí ($l \cdot m^{-1}$),
l_p	Délka přívodního potrubí (m).

Hodnota 1,1 v rovnici (11) značí přírázku pro eliminaci prvních 10 m, které jsou energeticky méně přínosné a také jako rezerva pro správnou funkci.

4.3.3. Realizace a výstroj vrtu

Vyhotovení vrtu musí být provedeno velmi kvalitně, protože pozdější oprava již není možná. Renomované firmy dnes disponují moderní vrtací technikou.

Kolektor se dnes používá výhradně typu U-sondy (Obr. 16). Tu tvoří PE-trubky 4x32. Dříve se na vystrojení používaly i trubky 2x40. Celkový objem trubek je stejný, ale použitím trubek 4x32 získáme celkovou větší plochu pro přestup tepla, tím lze s nimi dosáhnout odběru lepších hodnot i za cenu vyšších nákladů. Po zavedení kolektoru je provedena injektáž vrtu bentonitovou směsí, která dokonale vyplní nerovnosti mezi kolektorem a zbytkem vrtu, čímž umožňuje lepší přestup tepla z hornin do sondy. Navíc směs nikdy úplně nezatuhne, chrání tak sondu při možných pohybech podloží. Nakonec je zavedený kolektor podroben těsnicím a tlakovým zkouškám. Poté je kolektor naplněn nemrznoucí směsí, která bude odjímat teplo okolí a předávat ho do výparníku tepelného čerpadla. [6],[7]



Obr. 16 Příklad provedení vrtu podle standardu firmy Green Gas DPB a.s.[7].

4.4. Vzduch

Jako zdroj energie pro tepelná čerpadla lze využít okolní nebo také vnitřní vzduch.

4.4.1. Venkovní vzduch

Systém tepelného čerpadla využívá okolní vzduch, není nutno provádět žádné vrty a případné zemní práce jsou minimální. Primární okruh je vlastně nahrazen venkovní jednotkou, kterou tvoří výměník a ventilátor. Ten nasává venkovní vzduch, jemuž je odebírána energie ve výparníku. Průtok vzduchu, jenž ventilátor nasává, jsou řádově stovky až tisíce m³/h.

Způsobu provedení tepelných čerpadel ochlazujících venkovní vzduch je několik. Prvním je tzv. split, kde výměník s ventilátorem je umístěn mimo objekt a tepelné čerpadlo uvnitř budovy. Další možností je také provedení s vnitřní jednotkou, která odebírá a vypouští vzduch izolovaným otvorem ve stěně a poslední možností je umístění celého tepelného čerpadla mimo objekt.

Aby tepelné čerpadlo pracovalo co nejefektivněji, je nutné zaručit dostatečný přísun vzduchu, proto se venkovní jednotky umísťují na otevřené prostory, pokud možno dál od oken. To z důvodu produkce hluku venkovní jednotkou. Jelikož na výparníku, vlivem odebrání energie vzduchu, vzniká v zimě námraza, je nutné zajistit její odtávání.[3],[4]

4.4.2. Vnitřní vzduch

Vnitřní vzduch je u rodinných staveb málo využitelný. Pokud je dům vybaven strojovým větráním, aby bylo dosaženo požadované výměny vzduchu, lze větráním odváděný vzduch využít pro potřeby tepelného čerpadla. Vzduch odváděný při větrání má většinou teplotu okolo 20 °C, ale jeho množství pro pokrytí tepelných ztrát není dostačující, proto je nutné při využití tohoto způsobu zajistit dodatečný zdroj energie.

Velké využití má tento zdroj nízkopotenciální energie u pasivních domů, kde dokáže pokrýt zbytkovou potřebu tepla daného objektu.[3],[4]

5. Variantní řešení vytápění rodinného domu

Systém vytápění a ohřevu teplé užitkové vody bude proveden na novostavbě rodinného domu v katastru obce Darkovičky. Jedná se o jednopatrový a nepodsklepený dům.

Provedení návrhu tří variant systému vytápění:

- a1) Tepelné čerpadlo vzduch/voda - podlahové vytápění
- a2) Tepelné čerpadlo země/voda - podlahové vytápění
- a3) Elektrický teplovodní kotel - ústřední vytápění

Každá varianta vytápění bude obsahovat volbu zdroje a potřebných komponentů, způsob zapojení celého systému, určení množství elektrické energie spotřebované pro chod celé soustavy a celkové investiční náklady dané varianty. Do spotřeby elektrické energie bude spadat spotřeba zdroje energie, oběhových čerpadel, případně dalšího nutného příslušenství. Investiční náklady budou obsahovat cenu zdroje, ostatních zařízení (zásobník teplé vody, regulace a jiné) a také cenu zvoleného způsobu rozvodu pro vytápění nebo zhotovení primárního okruhu.

5.1. Výpočet energetické náročnosti

Pro optimální volbu vytápěcího systému a zdroje je nutné určit výpočtem tepelné ztráty. Podkladem pro výpočet tepelných ztrát je stavební projekt (Příloha 1). Konstrukční řešení objektu splňuje požadavky uvedené v normě ČSN 730 540 pro nové stavby. Kompletní seznam konstrukcí a materiálů obsahuje Příloha 6.

Výpočet tepelných ztrát je proveden podle normy [18] a pomocí výpočetního programu Techcon IVAR CS. Budova se nachází v krajině s normálním větrem a její poloha je částečně chráněná. Nejnižší venkovní výpočtová teplota je $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Objem vytápěných prostor je $315,4\text{ m}^3$.

$B = 8$

$t_e = -15\text{ }^{\circ}\text{C}$

Tab. 6 Přehled tepelných ztrát rodinného domu.

č.m	Účel místnosti	t_i [$^{\circ}\text{C}$]	p_1 [-]	p_3 [-]	sv.st r. [-]	n [1/h]	n_p [1/h]	V_{inf} [m^3/h]	S_{pdl} [m^2]	V_m [m^3]	Q_o [W]	Q_p [W]	Q_v [W]	Q_c [W]
101	Pokoj	20	0.03	0.00	JV	0.0	0.5	16.2	13.0	32.5	460	474	206	680
102	WC	20	0.03	0.05	SV	0.0	0.5	1.8	1.4	3.6	61	66	23	89
103	Koupelna	24	0.03	0.05	SV	0.0	0.5	9.3	7.4	18.6	338	366	131	497
104	T. místnost	20	0.03	0.05	SV	0.9	0.5	13.4	6.3	15.7	204	221	170	391
106	Šatna	20	0.03	0.05	SZ	0.0	0.5	4.0	3.2	8.0	181	196	51	247
107	Zádvěří	20	0.03	0.05	SZ	1.0	0.5	16.3	6.7	16.7	239	259	207	466
108	Jídelna+kk	20	0.03	0.05	SZ	0.0	0.5	56.7	45.4	113.3	1228	1327	717	2044
109	Sklad	20	0.03	0.00	JZ	0.0	0.5	1.6	1.3	3.2	66	68	21	89
111	Chodba	20	0.00	0.00	JZ	0.0	0.5	9.1	7.3	18.1	80	80	115	195
112	Pokoj	20	0.03	0.00	JV	0.0	0.5	16.1	12.9	32.2	350	361	204	565
113	Ložnice	20	0.03	0.00	JZ	0.0	0.5	26.7	21.4	53.4	760	783	338	1121
Suma									126.4	315.4	3967	4201	2183	6384

Celková tepelná ztráta rodinného domu: $Q_c = 6384 \text{ W}$

Tepelná ztráta prostupem: $Q_p = 4201 \text{ W}$

Tepelná ztráta větráním: $Q_v = 2183 \text{ W}$

5.1.1. Potřeba energie na vytápění a přípravu teplé užitkové vody

Určení potřebné energie během topné sezóny pro vytápění je závislé na místních podmínkách, délce topného období a venkovní minimální teplotě.

$$Q_{r,vyt} = \frac{24 \cdot \varepsilon \cdot Q_c \cdot (t_i - t_{e,pr}) \cdot d}{(t_i - t_e)} \cdot 3,6 \cdot 10^{-6} \quad (GJ \cdot r^{-1}) \quad (13)$$

kde

- ε je opravný součinitel na nesoučasnost tepelné ztráty infiltrací (ekvitermní regulace 0,67),
- Q_c tepelná ztráta budovy (W),
- t_i průměrná vnitřní výpočtová teplota ($^{\circ}\text{C}$)
- $t_{e,pr}$ průměrná venkovní teplota vzduchu v topném období ($^{\circ}\text{C}$),
- t_e výpočtová venkovní teplota ($^{\circ}\text{C}$),
- d počet dní topné sezony (-).

Pro určení potřeby energie na ohřev během celého roku je nutné napřed vypočíst denní potřebu tepla podle (14).

$$Q_{d,TUV} = \frac{\rho \cdot c \cdot V_d \cdot (t_{TUV} - t_0)}{3,6 \cdot 10^6} \quad (kWh) \quad (14)$$

- kde V_d je denní potřeba vody (m^3),
- t_{TUV} je požadovaná teplota teplé užitkové vody ($^{\circ}\text{C}$),
- t_0 je teplota vstupující vody pro ohřev ($^{\circ}\text{C}$),
- ρ je hustota vody ($1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$),
- c měrná tepelná kapacita vody ($4186 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$),

celoroční potřeba energie na přípravu teplé užitkové vody bude poté podle (15):

$$Q_{r,TUV} = Q_{d,TUV} \cdot d + 0,8 \cdot Q_{d,TUV} \cdot \frac{t_{TUV} - t_l}{t_{TUV} - t_z} \cdot (N - d) \quad (kWh \cdot r^{-1}) \quad (15)$$

- kde t_l je teplota vody užívané pro ohřev v létě ($^{\circ}\text{C}$),
- t_z teplota vody v zimě ($^{\circ}\text{C}$),
- N počet dní v roce, kdy je soustava pro ohřev teplé užitkové vody v chodu (-).

Tento vztah respektuje změnu teploty užívané pro ohřev teplé užitkové vody během celého ročního období, protože během topné sezony je nutno dodat více energie z důvodu nižších teplot vstupní vody určené pro ohřev. Celková potřeba energie za rok pro vytápění a ohřev teplé užitkové vody je poté dána podle rovnice:[9],[12]

$$Q_r = Q_{r,vyt} + Q_{r,TUV} \quad (kWh \cdot r^{-1}) \quad (16)$$

5.1.2. Určení potřeby energií pro RD

Pro konkrétní situaci rodinného domu obývaného 4-člennou rodinou, s tepelnou ztrátou 6,4 kW při minimální venkovní teplotě -15 °C, délkou topného období 229 dnů, při průměrné venkovní teplotě v topném období 4 °C bude potřeba tepla pro vytápění po dosazení do rovnice (13):

$$Q_{r,vyt} = \frac{24 \cdot 0,67 \cdot 6400 \cdot (20 - 4) \cdot 229}{[(20 - (-15))]} \cdot 3,6 \cdot 10^{-6} = 38,78 \quad GJ \cdot r^{-1}$$

$$Q_{r,vyt} = 11944,4 \quad kWh \cdot r^{-1}$$

Hodnota opravného součinitele byla zvolena podle typu užití regulace topné soustavy (ekvitermní regulace či prostorový regulátor $\varepsilon=0,67$). [12]

Poté potřeba energie pro ohřev teplé vody, kde minimální potřeba vody pro 4 osoby je 0,328 m³/den jak uvádí [9], požadavek na teplotu užitkové vody je 40 °C, bude při využití rovnice (14):

$$Q_{d,TUV} = \frac{1000 \cdot 4186 \cdot 0,328 \cdot (40 - 10)}{3,6 \cdot 10^6} = 11,442 \quad kWh$$

Po dosazení do rovnice (15) bude celoroční potřeba energie na ohřev teplé užitkové vody podle:

$$Q_{r,TUV} = 11,442 \cdot 229 + 0,8 \cdot 11,442 \cdot \frac{40 - 15}{40 - 5} \cdot (365 - 229) = 3509,4 \quad kWh \cdot r^{-1}$$

Při součtu těchto dvou hodnot energií získáme celoroční potřebu tepla pro vytápění i ohřev teplé užitkové vody podle vzorce (16):

$$Q_r = Q_{r,vyt} + Q_{r,TUV} = 11944,4 + 3509,4 = 15453,8 \quad kWh \cdot r^{-1}$$

Tab. 7 Přehled energetické náročnosti RD pro vytápění a ohřev.

$Q_{r,vyt}$ (MWh/r)	$Q_{r,TUV}$ (MWh/r)	Q_r (MWh/r)
11,94	3,51	15,45

Potřeba energie uvedené v Tab. 7 se může lišit v závislosti na klimatických podmínkách a způsobu provozu celé soustavy pro vytápění a ohřev teplé užitkové vody.

5.2. Varianta (a₁) vytápění tepelným čerpadlem Vzduch/Voda

Pokrytí tepelných ztrát bude zajišťovat tepelné čerpadlo VITOCAL 300-A typu vzduch/voda s venkovní jednotkou a regulovatelným jmenovitým topným výkonem 3-9 kW. Tepelné čerpadlo bude pracovat samostatně do venkovní teploty dané průsečíkem výkonového diagramu (Příloha 2) a tepelných ztrát budovy. V tomto bivalentním bodu bude automatickou regulací podle potřeby připojen stupňovitě zapojený elektrický průtokový ohřívač topné vody o výkonu 3/6/9 kW, který bude schopen při případných extrémních mrazech pokrýt celkovou tepelnou ztrátu rodinného domu. Součástí systému bude zásobník teplé užitkové vody o objemu 390 litrů. Tepelné čerpadlo je schopno pracovat v reverzním chodu, který umožní odmrazování výparníku při mrazivých dnech. Pracovní oblast je až do teploty venkovního vzduchu -20 °C. Jako rozvod vytápění je použito podlahové vytápění.[15]

Tab. 8 Parametry tepelného čerpadla VITOCAL 300-A.[15]

Teplotní rozsah	2°C/35°C	-10°C/40°C	-10°C/45°C
Tepelný výkon (kW)	9	6	5,9
El.příkon (kW)	2,4	2,6	2,8
Topný faktor (-)	3,8	2,3	2,1
Průměrný topný faktor ε_p (-)	3,26		

Průměrný topný faktor během celého roku je obtížné určit, proto jsem využil spojnicí trendu na výkonový diagram tepelného čerpadla VITOCAL 300-A (Příloha 7) a z výsledné rovnice je určen průměrný roční faktor pro výstupní teplotu 40°C a 45°C. Z poměru využití těchto topných faktorů na přípravě tepla pro vytápění a ohřev teplé užitkové vody určíme celoroční topný faktor. Jištění tepelného čerpadla je provedeno podle technické dokumentace. Hlavní domovní jistič je použit o velikosti 3 x 20 A. Životnost tepelného čerpadla, potažmo kompresoru, je díky modulaci výkonu uvažována v délce 25 let. [4],[5]

5.2.1. Bivalentní provoz

Pro vyhodnocení bivalentního provozu je dána podmínka, že při teplotách pod bivalentním bodem bude příprava teplé užitkové vody prováděna pouze elektrickým průtokovým ohřívačem.

Bivalentní bod tepelného čerpadla je určen na hodnotu -9 °C, protože v této teplotě se protíná křivka topného výkonu tepelného čerpadla a tepelných ztrát budovy. Pro určení spotřeby elektrické energie na pokrytí tepelných ztrát při mrazivých dnech, vycházím z teplot venkovního vzduchu za poslední tři topné sezony (2007-2010) a určím průměrný počet dnů při teplotě menší než -9 °C a průměrnou teplotu v těchto mrazivých dnech. Toto zjednodušení je možno si dovolit, protože podle výkonových diagramů tepelného čerpadla VITOCAL 300-A je změna topného výkonu při teplotách od 0°C až do -15 °C prakticky lineární (Příloha 2). Počet dní pod -9 °C a průměrnou teplotu během těchto dnů ukazuje Tab. 9.[13]

Tab. 9 Počet mrazivých dnů s teplotou pod -9 °C.

Mrazivé dny a průměrná teplota (2007-2010)	
Počet dní s teplotou pod -9°C (-)	7
Průměrná teplota během dnů pod -9°C (°C)	-12
Roční dokrytí potřeby tepla el. ohřevem (%)	1,3
Roční dokrytí potřeby tepla el. ohřevem $Q_{el.o}$ (kWh.r ⁻¹)	197,7
Roční pokrytí tepla tepelným čerpadlem $Q_{TC\%}$ (%)	98,7
Spotřeba energie na odtávání výparníku Q_{odt} (kWh.r ⁻¹)	618

Topný výkon tepelného čerpadla je podle výkonového diagramu a venkovní teploty -9°C roven tepelné ztrátě objektu. $Q_c = Q_{cv}$. Tepelná ztráta budovy při této teplotě je $Q_c = 5423$ W. Při uvažování přírůstky 0,8kW (6) na ohřev teplé užitkové vody vychází poté průměrná potřeba energie celého systému na 6,223kW. Pro určení potřeby tepla, které musí být hrazeno elektrickým ohřevem, vyjdu z předpokladu, že při bivalentní teplotě není potřeba druhého zdroje a při nejnižší výpočtové teplotě je nutno dokrýt tepelnou ztrátu 1,4 kW. Následně průměr těchto hodnot určí průměrnou tepelnou ztrátu 0,7 kW, kterou musí pokrýt elektrický ohřev. Potřeba tepla během 7 dnů je tedy 117,6 kWh. Jelikož není žádná rezerva výkonu tepelného čerpadla během těchto mrazivých dnů, probíhá příprava teplé užitkové vody pouze elektrickým ohřevem. Denní potřeba tepla pro přípravu teplé užitkové vody je podle rovnice (14) $Q_{d,TUV} = 11,442$ kWh a během 7 dnů je tedy hodnota energie na přípravu teplé užitkové vody 80,1 kWh. Sečtení těchto dvou hodnot dává spotřebu energie elektrickým ohřevem,

$$\Delta Q_d = \Delta Q \cdot 24 = 0,7 \cdot 24 = 16,8 \text{ kWh} \quad (17)$$

$$Q_{el.o} = (\Delta Q_d + Q_{d,TUV}) \cdot d_{pB} = (16,8 + 11,442) \cdot 7 = 197,7 \text{ kWh} \cdot r^{-1} \quad (18)$$

kde $Q_{el.o}$ roční potřeba tepla, která musí být hrazena elektrickým ohřevem (kWh.r⁻¹),
 ΔQ je průměrná tepelná ztráta objektu v oblasti teplot pod bivalentním bodem (kW),
 ΔQ_d je průměrná potřeba tepla, kterou je nutno pokrýt každý den při teplotách pod bivalentním bodem (kWh),
 d_{pB} počet dnů s teplotou pod -9°C (-).

Během mrazivých dní navíc vzniká námraza na výparníku, pro její odtávání je využito reverzního chodu tepelného čerpadla. Podle technické dokumentace [15] je doba reverzního chodu, nutného pro odtávání výparníku, průměrně 4% doby celkového chodu tepelného čerpadla. Jelikož potřeba energie během celého roku je $Q_r = 15,45$ MWh.r⁻¹, je poté potřebná energie na odtávání podle rovnice:

$$Q_{odt} = \frac{t_{odt} \cdot Q_r}{100} = \frac{4 \cdot 15450}{100} = 618 \text{ kWh} \cdot r^{-1} \quad (19)$$

kde t_{odt} je doba reverzního chodu nutného pro odtávání (%).

Poté se určí celková spotřeba elektrické energie nutná k provozu tepelného čerpadla během celého roku podle rovnice (20):

$$E_{r,a1} = \frac{Q_r \cdot Q_{TC\%} + Q_{odt}}{\varepsilon_p} + Q_{el.o} =$$

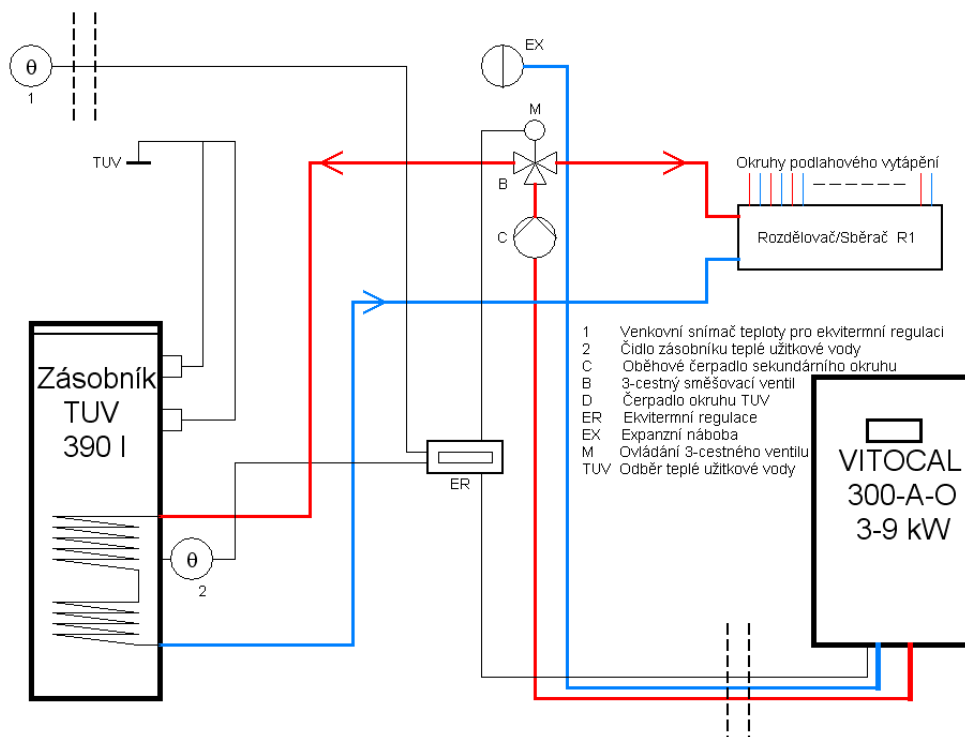
$$= \frac{15,45 \cdot 0,987 + 0,618}{3,26} + 0,1977 = 5,065 \text{ MWh} \cdot r^{-1} \quad (20)$$

kde $Q_{TC\%}$ je celkové roční pokrytí potřeby tepla tepelným čerpadlem (%),
 $Q_{el.o}$ je potřebná energie dodaná elektrickým ohřevem (MWh.r⁻¹),
 ε_p je průměrný roční topný faktor tepelného čerpadla (-).

V rovnici (20) je tedy zohledněno pokrytí roční potřeby tepla tepelným čerpadlem, nutnost energie na odtávání výparníku a spotřeba elektrické energie na dohřev v mrazivých dnech. Hodnoty jsou použity z Tab. 9.

5.2.2. Zapojení systému

Tepelné čerpadlo je v kompaktním provedení a je umístěno celé mimo budovu. Do objektu je pouze vedeno izolované potrubí s topnou vodou, které je napojeno přes 3cestný směšovací ventil. Ten je ovládán ekvitermní regulací, která podle nastavení určuje rozdělování topné vody pro vytápění či ohřev teplé užitkové vody v zásobníku o objemu 390 l. Ekvitermní regulace nastavuje teplotu topné vody, podle snímané venkovní teploty. Topný okruh je navíc doplněn o oběhové čerpadlo a expanzní nádobu. Její velikost je 12 l a maximální provozní přetlak je 4bar. Návrh je proveden pomocí programu Techcon IVAR CS a normy [19]. Zapojení je vykresleno na Obr. 17.



Obr. 17 Zapojení soustavy vytápění tepelného čerpadla VITOCAL 300-A.

Zapojení soustavy a použité komponenty vychází z cenové nabídky, kterou obsahuje Příloha 8..

5.3. Varianta (a₂) vytápění tepelným čerpadlem Země/Voda

Jako zdroj tepla bude využito tepelné čerpadlo VITOCAL 222-G typu země/voda, které bude krýt veškeré tepelné ztráty objektu i potřebu teplé užitkové vody. Tepelné čerpadlo má integrovaný zásobník teplé užitkové vody o objemu 170 l a je také vybaveno průtokovým ohřívačem o výkonu 9 kW, pro případný dohřev teplé užitkové vody na vyšší teplotu. Jako primární zdroj energie bude využit geotermální vertikální vrt.[14]

Tab. 10 Výkonové hodnoty tepelného čerpadla 222-G.[14]

Teplotní rozsah	0°C/35°C	4°C/40°C	4°C/45°C
Tepelný výkon (kW)	6,2	6,6	6,4
Chladicí výkon (kW)	4,9	5	4,8
El.příkon (kW)	1,4	1,6	1,9
Topný faktor (-)	4,2	4,1	3,37
Průměrný roční TF (-)	3,93		

Rozsah teplot 0°C/35°C je určen podle normy EN 14511, teplota topné vody 40°C bude využita pro topné okruhy podlahového vytápění. Teplota topné vody 45°C bude ohřívat teplou užitkovou vodu na teplotu na 40 °C. V hodnotě elektrického příkonu jsou zahrnuty i odběry čerpadel primárního a topného okruhu. Pro určení spotřeby elektrické energie na provoz tepelného čerpadla po celý rok je určující spotřeba tepla (Tab. 7) pro vytápění a ohřev teplé užitkové vody. Jelikož je topení a příprava teplé užitkové vody v jiných teplotních rozsazích, bude i odlišný topný faktor. Potřeba tepla pro vytápění $Q_{r,vyt}$ je připravována při topném faktoru 4,1, jenž tvoří 77,3 % průměrného topného faktoru. Zatímco ohřev teplé užitkové vody je kvůli vyšší výstupní teplotě, prováděn při topném faktoru 3,37, ten tvoří 22,7 % průměrného faktoru tepelného čerpadla. Poté celoroční průměrný faktor tepelného čerpadla je roven 3,93. Při použití a upravení vzorce (4) bude roční spotřeba elektrické energie podle:

$$E_{r,a2} = \frac{Q_r}{\varepsilon_p} = \frac{15,45}{3,93} = 3,927 \text{ MWh} \cdot r^{-1} \quad (21)$$

kde $E_{r,a2}$ je roční spotřeba elektrické energie tepelným čerpadlem (MWh.r⁻¹).

Jištění kompresoru tepelného čerpadla bude provedeno podle technické dokumentace. Hlavní domovní jistič bude použit 3 x 20 A a je nutné při zapojení jednotlivých elektrických okruhů dbát na rovnoměrné rozložení zatížení na jednotlivé fáze. Životnost tepelného čerpadla a především jeho kompresoru je uvažována minimálně 20 let, jak se uvádí v [4].

5.3.1. Dimenzování vrtu

Potřebná délka vrtu se určí podle (11), tedy podle chladicího výkonu tepelného čerpadla VITOCAL 222-G. Podle provozních diagramů tepelného čerpadla a Tab. 10 je největší chladicí výkon $Q_k = 5 \text{ kW}$ a to při teplotním rozsahu 4°C/40°C, který je určen pro vytápění. Tuto hodnotu chladicího výkonu využijeme pro volbu délky vrtu.

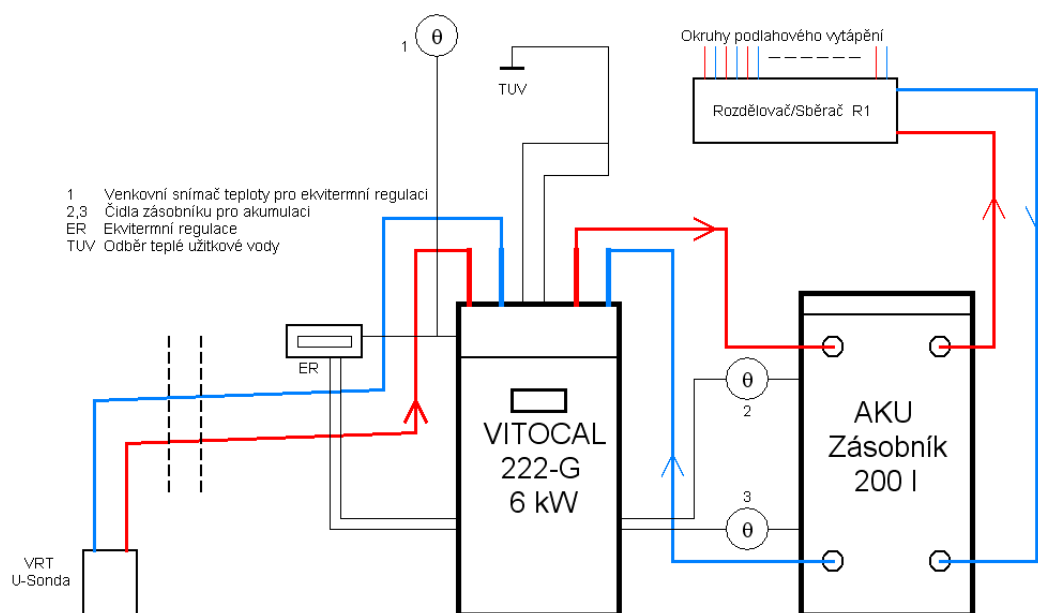
$$l_s = 1,1 \cdot \frac{Q_K}{q_s} = 1,1 \cdot \frac{5000}{50} = 110 \text{ m}$$

Náklady na zhotovení vrtu jsou 900 Kč/m [7]. V ceně je vystrojení vrtu kolektorem, které představuje dvojité U-sonda (PE-trubice 4x32), zalití injektážní směsí, provedení těsnících a tlakových zkoušek. Jako teplosnosné médium bude použito Tyfocor a jeho množství se určí podle rovnice (12):

$$V_m = 2 \cdot l_s \cdot 2 \cdot V_p + l_p \cdot V_p = 2 \cdot 110 \cdot 2 \cdot 0,531 + 10 \cdot 0,531 = 238,95 \rightarrow \text{volí se } 240 \text{ l}$$

5.3.2. Zapojení soustavy tepelného čerpadla země/voda

Tepelné čerpadlo VITOCAL 222-G je umístěno v technické místnosti a je doplněno akumulčním zásobníkem topné vody pro omezení častého spínání kompresoru. Přepínání okruhu vytápění a ohřevu teplé užitkové vody zajišťuje 3cestný ventil, který je zabudován přímo v tepelném čerpadle. Stejně tak jako čerpadla primárního a sekundárního okruhu.



Obr. 18 Zapojení soustavy tepelného čerpadla VITOCAL 222-G.

Ovládání celé soustavy zajišťuje ekvitermní regulace, která je součástí dodávky tepelného čerpadla. Napojení od vrtu k tepelnému čerpadlu je provedeno v mírném sklonu tak, aby tepelné čerpadlo bylo vůči vrtu umístěno nejvýše, tím se zajistí bezproblémové odvzdušnění. Expanzní nádoba a pojistný ventil jsou součástí primární sady, dodávané jako příslušenství tepelného čerpadla. Zabezpečovací zařízení topného okruhu tvoří pojistný ventil a expanzní nádoba o objemu 12 l a s maximálním provozním přetlakem 4 bar. Návrh byl proveden pomocí programu Techcon IVAR CS a odpovídá normě [19]. Zapojení soustavy a použité komponenty vychází z cenové nabídky, kterou obsahuje Příloha 8.

5.4. Podlahové vytápění pro tepelná čerpadla

Obě varianty vytápění pomocí tepelného čerpadla budou napojeny na teplovodní podlahové vytápění, které je doplněno otopným tělesem. Jednotlivé okruhy podlahového vytápění jsou napojeny na 12cestný rozdělovač/sběrač topné vody pro podlahové vytápění s označením R1. Objem vody v celém rozvodu podlahového vytápění je 112,9 l. Každý okruh je vybaven regulačním ventilem pro nastavení hydraulické rovnováhy. Hodnoty nastavení ventilu jsou uvedeny v Tab. 11.

Tab. 11 Přehled jednotlivých topných okruhů podlahového vytápění.

Místnost	Okruh vytápění	Délka okruhu (m)	Nastavení ventilu
1.01 - Pokoj	1	57	13,10
1.02 - WC	1	22	4,40
1.03 - Koupelna	1	32	9,80
1.03 - Koupelna	2 (otopné těleso)	6,5	-
1.04 - Technická místnost	1	31	10,40
1.06 - Šatna	1	28	6,70
1.07 - Zádveří	1	54	11,60
1.08 - Jídelna	1	49	10,60
1.08 - Jídelna	2	48	10,60
1.08 - Jídelna	3	58	10,80
1.12 - Pokoj	1	46	9,90
1.13 - Ložnice	1	78	16,00

Trubky podlahového vytápění budou uloženy ve fixační liště a následně zality cementovou mazaninou. Systém bude provozován v teplotním spádu 40°C/30°C a maximální teplota podlahy je 29 °C. Tato teplota a omezené využití podlahy má limitující faktor na výkon, a proto v koupelně (místnost 103) podlahové vytápění není schopné pokrýt celkové tepelné ztráty místnosti, proto je doplněno žebříkovým otopným tělesem, které je rovněž provozováno v teplotním spádu 40°C/30 °C a je také napojeno na rozdělovač R1. Konstruktivní složení podlahy je uvedeno v Tab. 12.

Tab. 12 Skladba konstrukce podlahového vytápění.

Materiál	Tloušťka (mm)	Tepelná vodivost ($W.m^{-1}.K^{-1}$)
Keramická dlažba	20	1,010
Cementová mazanina	65	1,200
Potrubí ALPEX ve fixační liště	20 (průměr)	-
Tepelná izolace ROLLROCK	80	0,039
Základová deska (železobeton)	200	1,430
Pískovec	300	1,295

Výpočet rozvodu vytápění a dimenzování délky potrubí v jednotlivých místnostech je dáno podle tepelných ztrát daného prostoru (Tab. 6). Rozmístění rozvodu vytápění obsahuje Příloha 3.

5.4.1. Regulace podlahového vytápění a otopného tělesa

Podlahové vytápění má určitý stupeň samoregulace. Pokud není teplotní rozdíl mezi teplotou podlahy a vzduchem v místnosti, nedochází k předávání tepla., takže při snižování teplotního rozdílu, například vlivem vnitřních tepelných zisků (osoby, vaření), se snižuje i předávání tepla do místnosti. Jako hlavní regulační člen pro ovládání systému podlahového vytápění je ekvitermní regulace, která je dnes běžně využívána u tepelných čerpadel. Regulace nastavuje teplotu topné vody podle venkovní teploty a také řídí chod kompresoru tepelného čerpadla. Ochranu proti překročení maximální dovolené teploty podlahy zajišťuje snímač teploty topné vody.

Topné těleso umístěné v koupelně je navíc vybaveno termostatickou hlavici, která zajišťuje jeho správnou regulaci a to zejména při nižších tepelných ztrátách místnosti, aby nedošlo k přetopení prostoru.

5.4.2. Náklady na podlahové vytápění a otopná tělesa

Investiční náklady jsou určeny podle projektu vytápění vytvořeného v programu Techcon IVAR a obsahují materiál nutný k pořízení rozvodu podlahového vytápění a doplňkového otopného tělesa. Stručný přehled cenových nákladů uvádí Tab. 13 a podrobný soupis nákladů jednotlivých komponentů obsahuje Příloha 5.

Tab. 13 Cenový přehled nákladů na rozvod podlahového topení.

Materiál	Cena
Potrubí a fixační materiál	30 272 Kč
Rozdělovač/sběrač R1	12 934 Kč
Otopné těleso	4 720 Kč
Ostatní materiál (folie, dilatační pas, atd.)	7 119 Kč
Celková cena rozvodu vytápění	55 044 Kč

Cena práce za montáž bude připočtena při celkové kalkulaci investičních nákladů.

5.5. Varianta (a_3) vytápění elektrickým teplovodním kotlem

Teplovodní elektrický kotel bude zajišťovat topnou vodu pro ústřední vytápění a také ohřívat teplou užitkovou vodu v zásobníku o objemu 200 l. Kotel má regulovatelný výkon ve třech stupních 3,6,9 kW, již zabudované čerpadlo topné vody, pojistný a odvzdušňovací ventil a také expanzní nádobu. Topná tělesa představují odporové spirály. Spínání výkonových stupňů kotle probíhá postupně s odstupem 20 vteřin, aby nedocházelo ke vznikům proudových rázů.[16]

Tab. 14 Parametry elektrického kotle POROTHERM.[16]

Parametr	Jednotka
El. příkon (kW)	9
Účinnost (%)	99,5
Tepelný výkon (kW)	8,96
Max. teplota topné vody (°C)	85
Velikost jističe pro kotel (A)	16

Ohřev teplé užitkové vody bude probíhat v nepřímo ohřívaném zásobníku na teplotu 40 °C, ale regulaci jí bude možno nastavovat podle potřeby v rozmezí 35-60 °C. Regulaci a ovládáním 3cestného ventilu je nastaven přednostní ohřev teplé užitkové vody před vytápěním.

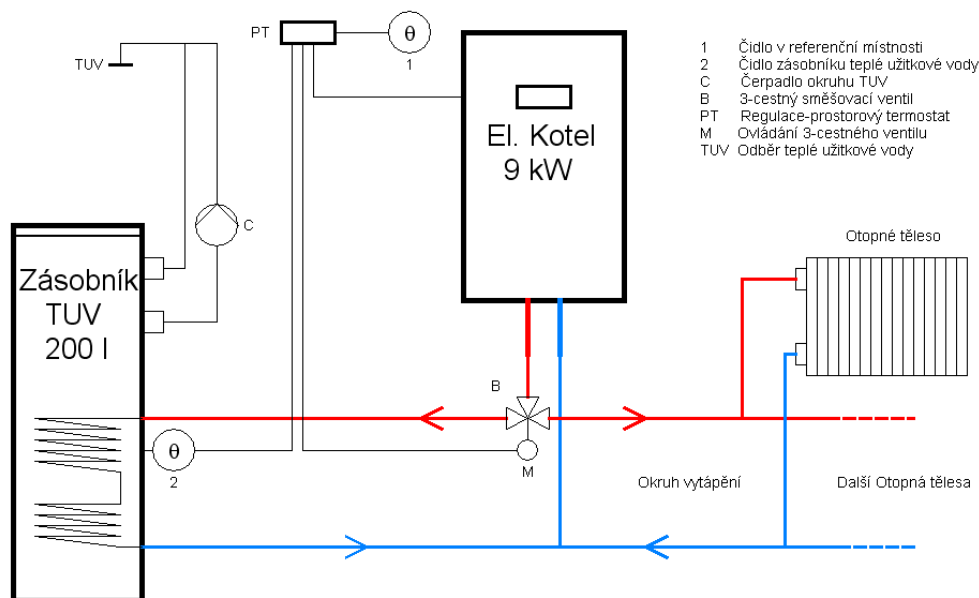
Spotřeba elektrické energie je dána potřebou tepla podle Tab. 7 a účinností elektrického kotle a určí se poté podle rovnice:

$$E_{r,a3} = \frac{Q_r}{\eta} = \frac{15,45}{0,995} = 15,5576 \text{ MWh} \cdot r^{-1} \quad (22)$$

Volba jističe pro kotel je podle Tab. 14. Hlavní domovní jistič je zvolen na hodnotu 3 x 20 A. Větší velikost jističe by byla zvolena tehdy, pokud by se předpokládaly v chodu další významné elektrické spotřebiče. Ekonomické-technická životnost elektrického kotle je uvažována 15 let, jak se uvádí v [9].

5.5.1. Zapojení soustavy

Elektrický kotel a zásobník teplé užitkové vody jsou umístěny v technické místnosti. Rozvod topné vody pro přípravu teplé užitkové vody a vytápění ovládá 3cestný ventil, který je řízen regulací. Čidlo prostorového termostatu se umístí v místnosti 108, a to z důvodu nejčastějšího výskytu osob v tomto prostoru. Čidlo je umístěno na protější stěně vůči oknům a to ve výšce minimálně 1,5 m, tak aby nedocházelo k jeho ovlivňování, které by mohlo způsobit například sluneční záření. Hlavním pojistným zařízením je ventil s otevíracím přetlakem 300 kPa, který je součástí zdroje. Elektrický kotel má integrovanou expanzní nádobu o objemu 10 l a její velikost je dostačující a vyhovuje normě [19]. Způsob zapojení celého rozvodu obsahuje Obr. 19.



Obr. 19 Zapojení soustavy elektrického teplovodního kotle.

5.6. Rozvod vytápění pro elektrický teplovodní kotel

Teplovodní elektrický kotel bude dodávat teplo ústřednímu vytápění složenému s otopných těles dimenzovaných na teplotní spád 65°C/55°C. Velikost otopných těles je zvolena podle tepelných ztrát jednotlivých místností podle Tab. 6. Rozvod otopných těles je proveden jako paralelní a potrubí je vedeno ve stropě. Schéma a rozmístění otopných těles obsahuje Příloha 4. Rozvod byl navržen pomocí programu Techcon IVAR CS.

Tab. 15 Přehled nákladů na rozvod vytápění pomocí otopných těles.

Materiál	Cena
Otopná tělesa (11 ks)	25 487 Kč
Rozvodné potrubí (100 m)	6 000 Kč
Regulační prvky (Termostatické hlavice)	8 976 Kč
Šroubení na otopná tělesa	10 874 Kč
Vypouštěcí a odvzdušňující ventily	1 385 Kč
Celková cena rozvodu vytápění	52 722 Kč

5.6.1. Regulace ústředního vytápění

Ovládání kotle a teplovodní soustavy bude zajišťovat prostorový termostat umístěn v obývacím pokoji mimo dosah oken a zdrojů tepla, aby nedošlo k jeho ovlivnění. Jelikož provedení rozvodu je paralelní a jednotlivá otopná tělesa jsou navíc vybavena termostatickými hlavicemi, lze ovládat jednotlivé topné okruhy změnou nastavení termostatických hlavic.

6. Ekonomické zhodnocení s výhledem na životnost

Pro zhodnocení ekonomické stránky je nutno ještě určit provozní náklady všech tří navržených variant vytápění. Rozhodující je spotřeba elektrické energie na provoz každého systému vytápění. Jako hodnotící metody budou použity doba návratnosti investice a pro určení nejvhodnější varianty, metoda multikriteriální analýzy.

6.1. Určení provozních a investičních nákladů variant vytápění

Pro každou variantu určíme náklady na provoz podle spotřeby $E_{r(ai)}$, zvolené sazby pro tepelné čerpadlo či elektrický kotel, která se skládá z ceny za zvolený jistič a ceny netto za kWh elektrické energie, jak se uvádí v [17]. Provozní náklady každé varianty se určí podle rovnice:

$$N_{p,ai} = E_{r,ai} \cdot NT + PJ \cdot 12 \quad (Kč.r^{-1}) \quad (23)$$

kde $E_{r,ai}$ je spotřeba elektrické energie dané varianty (kWh),

NT je netto cena za jednu kilowatthodinu (Kč),

PJ je stálá měsíční platba za hlavní domovní jistič (Kč).

Tab. 16 Přehled hodnot pro výpočet provozních nákladů.

Varianta	a_1	a_2	a_3
Spotřeba $E_{r,a}$ (kWh. r^{-1})	5064,9	3931,3	15527,6
Sazba (-)	D56d	D56d	D45d
NT cena (Kč/kWh)	2,19	2,19	2,18
Platba za jistič (Kč/měsíc)	321,6	321,6	390
ε_p, η (-)	3,26	3,96	0,995

Stanovení provozních nákladů jednotlivých variant je poté:

Varianta a_1 :

$$N_{p,a1} = E_{r,a1} \cdot NT + PJ \cdot 12 = 5064,9 \cdot 2,19 + 321,6 \cdot 12 = 14951,33 \quad Kč.r^{-1}$$

Varianta a_2 :

$$N_{p,a2} = E_{r,a2} \cdot NT + PJ \cdot 12 = 3931,3 \cdot 2,19 + 321,6 \cdot 12 = 12468,74 \quad Kč.r^{-1}$$

Varianta a_3 :

$$N_{p,a3} = E_{r,a3} \cdot NT + PJ \cdot 12 = 15527,6 \cdot 2,19 + 321,6 \cdot 12 = 37864,73 \quad Kč.r^{-1}$$

Jelikož ceny energií se mohou měnit a předpokládá se spíše všeobecně růst cen energií, je možné určit provozní náklady při ročním růstu či poklesu cen o procento r ,

$$N_{rp,ai} = N_{p,ai} \cdot \left(1 + \frac{r}{100}\right) \quad (Kč.r^{-1}) \quad (24)$$

kde $N_{rp,ai}$ jsou provozní náklady v daném roce s uvažováním změny cen energií (Kč),

r je roční změna ceny energie (%).

Do investičních nákladů jsou zahrnuty všechny položky pro kompletní pořízení dané varianty vytápění. Skládají se z ceny za zdroj tepla, potřebné příslušenství, rozvod vytápění a za montáž a instalaci.

Tab. 17 Celkový přehled investičních nákladů variant vytápění a jejich provozních nákladů.

Položka	Tepelné čerpadlo Vzduch/Voda (a_1)	Tepelné čerpadlo země /voda (a_2)	Teplovodní el. kotel (a_3)
Zdroj tepla	295 332 Kč	173 100 Kč	20 160 Kč
Zásobník TUV	58 776 Kč	Vestavěn	20 832 Kč
Akumulační zásobník	není potřeba	19 116 Kč	není potřeba
Regulace	Vestavěn	Vestavěn	2 100 Kč
Příslušenství sekundárního okruhu	33 876 Kč	28 092 Kč	5 472 Kč
Příslušenství primárního okruhu	Vestavěn	60 732 Kč	není potřeba
Zhotovení primárního zdroje	Vestavěn	99 000 Kč	není potřeba
Rozvod vytápění	55 040 Kč	55 040 Kč	52 722 Kč
Práce a uvedení do provozu	45 000 Kč	45 000 Kč	45 000 Kč
Celkové pořizovací náklady	488 024 Kč	480 080 Kč	146 286 Kč
Provozní náklady	14 951 Kč	12 469 Kč	37 865 Kč

Provozní náklady nezahrnují případné náklady na opravy a revize. Jedná se čistě o peníze vynaložené za elektrickou energii nutnou k provozu zařízení během celého roku. Podle provozních nákladů za rok lze také určit cenu tepla podle rovnice:

$$Q_{Kč,ai} = \frac{N_{p.ai}}{Q_r} \text{ Kč} \cdot kWh^{-1} \quad (25)$$

kde $Q_{Kč,ai}$ je cena tepla získané danou variantou vytápění (Kč/kWh).

Varianta a_1 tepelné čerpadlo vzduch/voda:

$$Q_{Kč,a1} = \frac{N_{p.ai}}{Q_r + Q_{odt}} = \frac{14951}{15450 + 618} = 0,93 \text{ Kč} \cdot kWh^{-1} \quad (26)$$

Pozn.: U této varianty vytápění je nutné započíst i potřebu tepla pro odtávání výparníku.

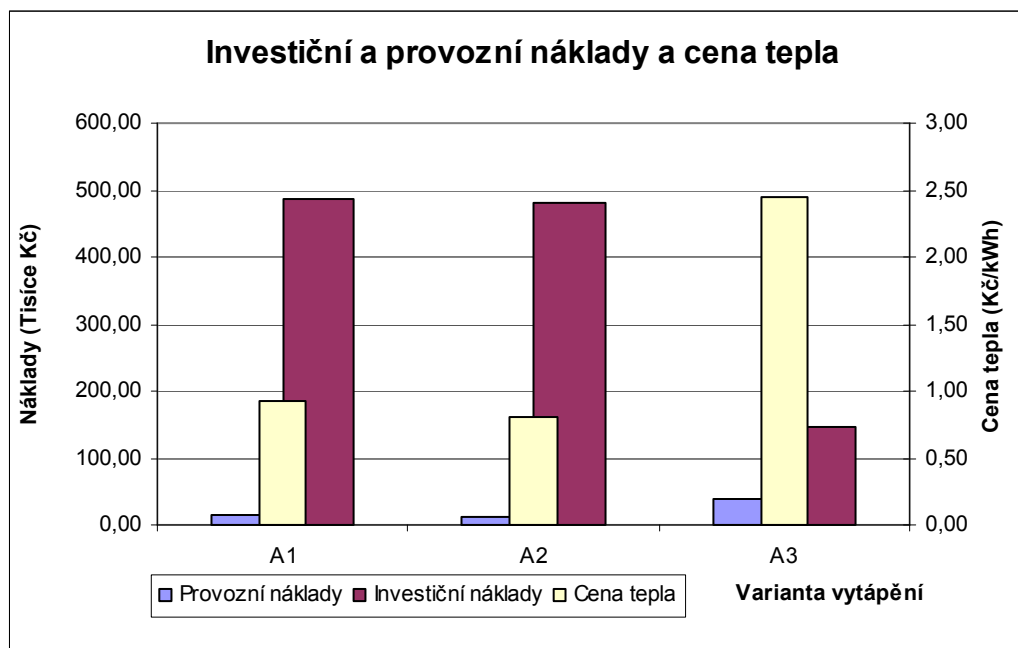
Varianta a_2 tepelné čerpadlo země/voda:

$$Q_{Kč,ai} = \frac{N_{p.ai}}{Q_r} = \frac{12496}{15450} = 0,81 \text{ Kč} \cdot kWh^{-1} \quad (27)$$

Varianta a_3 teplovodní elektrický kotel:

$$Q_{Kč,ai} = \frac{N_{p.ai}}{Q_r} = \frac{37865}{15450} = 2,45 \text{ Kč} \cdot kWh^{-1} \quad (28)$$

Pro názornost jsou všechny náklady, a to jak investiční, provozní a cena za jednotku tepla, zobrazeny v Obr. 20.



Obr. 20 Grafický přehled investic, provozních nákladů a ceny tepla navržených systému vytápění.

6.1.1. Doba návratnosti investic

Pro určení návratnosti systémů vytápění použijí ekonomický ukazatel, tzv. dobu návratnosti investice. Jedná se o jednoduchý a často užívaný ukazatel vhodnosti investice. Uvažuje se bezproblémový chod všech variant vytápění a to díky tomu, že při správném provozu a zanedbání možných rušivých vlivů, nevyžaduje žádná varianta nějakou velkou opravu během své životnosti. Proto je doba návratnosti brána jako směrodatný ukazatel vhodnosti investice. Doba návratnosti je vždy brána vůči variantě vytápění s největšími náklady na provoz. V této práci se jedná o systém elektrického teplovodního kotle (varianta a_3). Prostá doba návratnosti investice DN se tedy určí podle rovnice:

$$DN = \left| \frac{\Delta N_{p,ai}}{\Delta N_p} \right| \quad (rok) \quad (29)$$

kde DN je doba návratnosti investice (Kč).

$\Delta N_{p,ai}$ je rozdíl investičních nákladů dvou srovnávaných variant (Kč),

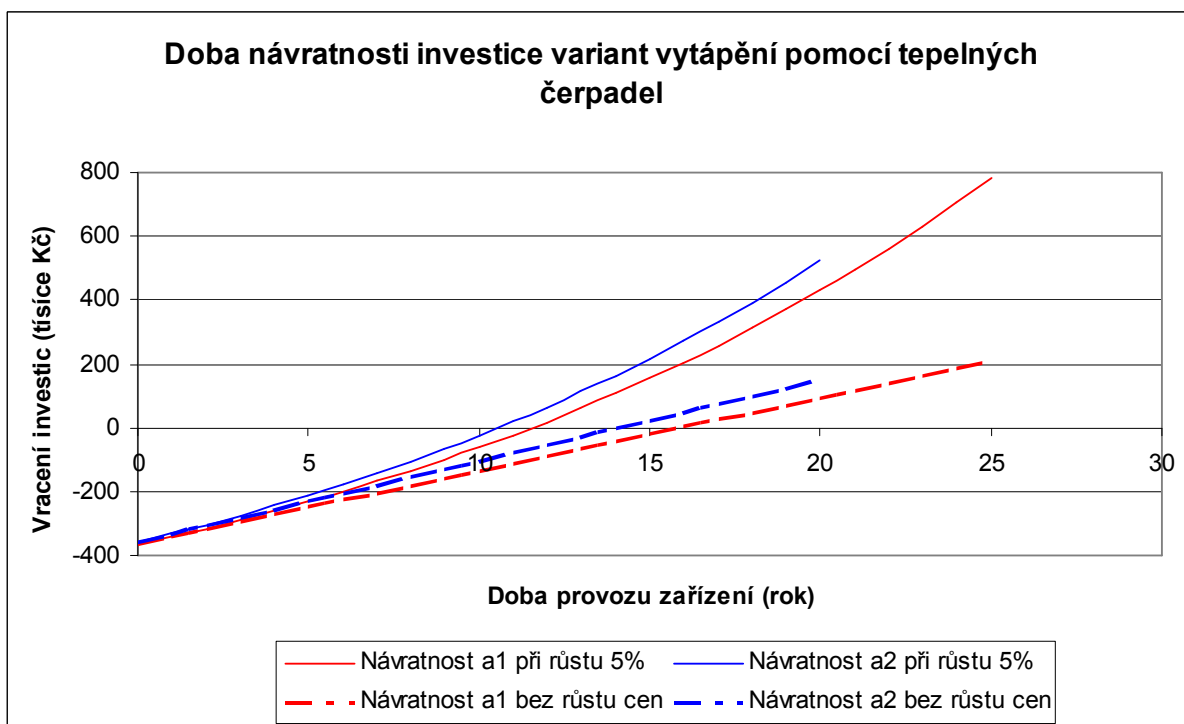
ΔN_p je rozdíl provozních nákladů dvou srovnávaných variant (Kč).

Při uvažování změny cen energií během provozu zařízení je poté doba návratnosti ovlivněna procentem změny ceny elektrické energie podle rovnice (30):

$$DN, r = \left| \frac{\Delta N_{pr,ai}}{\Delta N_p} \right| \quad (rok) \quad (30)$$

kde $\Delta N_{pr,ai}$ jsou provozní náklady v daném roce s uvažováním změny ceny elektrické energie (Kč).

Na Obr. 21 jsou zobrazeny doby návratnosti tepelných čerpadel vůči systému na elektrický kotel. Pro srovnání s vlivem růstu cen je vykreslena i doba návratnosti při průměrném ročním růstu ceny elektrické energie o 5%.



Obr. 21 Grafické znázornění návratnosti investic do systému vytápění.

Růst cen je uvažován pouze hypoteticky, protože trend změny cen nelze do budoucna relevantně určit. Doba návratnosti je uvažována k délce životnosti tepelných čerpadel.

6.2. Analýza variant a určení nejvhodnějšího vytápění

Pro objektivní posouzení vhodnosti každé varianty nestačí pouze investiční a provozní náklady, rozhodující jsou i další kritéria, podle kterých je nutno všechny varianty vzájemně porovnat, proto pro posouzení jednotlivých navržených variant využijí metod multikriteriální analýzy. Pro hodnocení si zvolím kritéria, která musí být možná aplikovat na všechny navržené varianty. Vyhodnocení bude provedeno pomocí tzv. kritériální matice (31), kde v matici řádky reprezentují jednotlivé varianty a sloupce představují zadaná kritéria pro hodnocení. [1]

$$\begin{matrix} & f_1 & f_2 & \cdots & f_j \\ \begin{matrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_i \end{matrix} & \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1j} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{i1} & y_{i2} & \cdots & y_{ij} \end{bmatrix} & & &
 \end{matrix} \quad (31)$$

6.2.1. Stanovení kritérií

Pro systém vytápění, ať už je jakýkoliv, je nejdůležitější cena. První dvě kritéria jsou tedy investiční a provozní náklady celého systému.

f_1 - Investiční náklady ve statisících Kč (min),

f_2 - Provozní náklady v desetitisících Kč (min),

f_3 – Technicko-ekonomická životnost zdroje tepla v rocích (max),

f_4 - Vliv na životní prostředí (min).

Investiční a provozní náklady jsou uvedeny v Tab. 17. Neuvažují se náklady na opravy nebo revize. Životnost je stanovena pro každý typ zdroje podle způsobu provozu, zapojení a pomocí odborné literatury. U tepelných čerpadel se uvažuje životnost 20 let pro variantu a_2 , respektive 25 let pro variantu a_1 a u elektrického kotle je životnost 15 let.

Vliv na životní prostředí je brán z globálního hlediska, protože v místě využití se jedná o čisté zdroje energie. Uvažován je podíl potřeby elektrické energie na provoz celého systému vytápění. Jelikož je elektrická energie v ČR produkována přibližně ze 60% v tepelných elektrárnách, které spalují hnědé nebo černé uhlí. Toto kritérium tedy vyjadřuje nepřímý vliv daného systému vytápění na snížení produkce skleníkových plynů. Podíl potřeby elektrické energie se určí podle její potřeby každým systémem vytápění podle Tab. 16. Elektrický kotel potřebuje na přípravu tepla 100% elektrické energie, podíl varianty a_1 je 32,62 % a u varianty a_2 je tento podíl úspory 25,32 %.

6.2.2. Určení vah kritérií

Pro určení jednotlivých vah kritérií použijeme metodu párového srovnání kritérií, tzv. Fullerovou metodu, která porovnává důležitost jednotlivých kritérií mezi sebou. Počet srovnání poté je : [1]

$$N = \frac{k \cdot (k - 1)}{2} \quad (32)$$

Srovnání se provádí v tzv. Fullerově trojúhelníku a kritéria mají pevně stanovená pořadová čísla, a to $1, 2, \dots, k$ a každá dvojice kritéria je v něm obsažena jen jednou. Počet označení daného kritéria se značí n_j a váha kritéria se poté určí podle:

$$v_j = \frac{n_j}{N} \quad kde \quad j = 1, 2, \dots, k \quad (33)$$

$$\begin{array}{c}
 (f_1) \quad (f_1) \quad (f_1) \\
 (f_2) \quad (f_3) \quad f_4 \\
 \hline
 (f_2) \quad (f_2) \\
 (f_3) \quad f_4 \\
 \hline
 (f_3) \\
 (f_4)
 \end{array} \quad (34)$$

Investiční náklady jsou stejně důležité jako provozní náklady a životnost zdroje, ale důležitější než vliv na životní prostředí, proto kritérium $f_1=2b$. Provozní náklady jsou stejně důležité jako životnost zdroje tepla, ale důležitější než vliv na životní prostředí, tudíž celkově $f_2=1,5b$ a kritérium f_3 je zakroužkováno třikrát jako stejně závažné tudíž taktéž $f_3=1,5b$. Vliv na životní prostředí je roven v důležitosti kritériu životnosti a tudíž jeho ohodnocení je $f_4=0,5b$. Poté výsledná váha zvolených kritérií je po dosazení do vzorce (33):

$$v = (0,33; 0,25; 0,25; 0,17) = \sum v = 1 \quad (35)$$

Tab. 18 Přehled hodnoty váhy daných kritérií.

Kritérium	Váha (vj)
f_1 - investiční náklady	0,33
f_2 - provozní náklady	0,25
f_3 - životnost zdroje	0,25
f_4 - vliv na životní prostředí	0,17
Suma kritérií Σv	1,00

Tyto hodnoty vah využijeme při analýze podle metody váženého součtu v následující kapitole.

6.2.3. Metoda váženého součtu WSA

Metoda váženého součtu využívá princip maximalizace účinku, ale předpokládá lineární funkci užitku. Vychází se z kritériální matice určené podle rovnice (31) a daných hodnot podle určených kritérií. Nejprve musíme vytvořit všechny kritéria jako maximalizační a to podle: [1]

$$Y_{ij-\max} = H_{j-\min} - Y_{ij-\min} \quad (36)$$

Převedení minimalizačních kritérií se provede tak, že od největšího prvku v každém sloupci odečteme ostatní prvky (20). Následně se vytvoří normalizovaná matice $R=(r_{ij})$ podle:

$$r_{ij} = \frac{Y_{ij} - D_j}{H_j - D_j} \quad (37)$$

Kde D_j je minimální a H_j je maximální hodnota kritéria ve sloupci j . Matice R potom představuje transformované kritériální hodnoty v rozmezí $<0;1>$. Následně podle zvolených vah kritérií se určí užitek každé varianty řešení: [1]

$$u(a_i) = \sum_{j=1}^k v_j \cdot r_{ij} \quad (38)$$

Varianta s větším užitekem je lepší a naopak.

6.2.4. Volba nejlepší varianty vytápění

Vytvoříme kritériální matici podle kritérií f_1 - f_4 (kapitola 6.2.1.), kde dosadíme investiční a provozní náklady z Tab. 17. Provedeme převedení všech minimalizačních kritérií na maximalizační tím, že od každé hodnoty v jednotlivých sloupcích odečteme největší hodnotu v daném sloupci j .

$$Y = \begin{matrix} & f_1 & f_2 & f_3 & f_4 \\ \begin{matrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{matrix} & \begin{vmatrix} 488 & 14,95 & 25 & 32,62 \\ 480 & 12,47 & 20 & 25,32 \\ 146 & 37,87 & 15 & 100 \end{vmatrix} \end{matrix} \rightarrow Y = \begin{matrix} & f_1 & f_2 & f_3 & f_4 \\ \begin{matrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{matrix} & \begin{vmatrix} 0 & 22,92 & 25 & 67,38 \\ 8 & 25,4 & 20 & 74,68 \\ 342 & 0 & 15 & 0 \end{vmatrix} \end{matrix} \rightarrow$$

Ze získané matice určíme maximální hodnoty H a minimální hodnoty D pro každý sloupec j .

$$H=(342;25,4;25;75)$$

$$D=(0;0;15;0)$$

Poté vytvoříme podle vzorce (37) tzv. normalizovanou kritériální matici R , z které podle určených vah jednotlivých kritérií, podle Tab. 18 a vzorce (38) určíme užitek každé varianty vytápění.

$$R = \begin{matrix} & f_1 & f_2 & f_3 & f_4 \\ \begin{matrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{matrix} & \begin{vmatrix} 0 & 0,902 & 1 & 0,902 \\ 0,023 & 1 & 0,5 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \end{matrix} \rightarrow$$

$$\text{Varianta } a_1=0+0,2255+0,25+0,15334=0,62884$$

$$\text{Varianta } a_2=0,00759+0,25+0,125+0,17=0,55259$$

$$\text{Varianta } a_3=0,33+0+0+0=0,33$$

Největšího užítka dosáhla varianta a_1 , tedy soustava vytápění pomocí tepelného čerpadla vzduch/voda. Varianty jsou podle dosaženého užítka seřazeny v Tab. 19.

Tab. 19 Přehled variant podle největšího užítka

Varianta vytápění	Hodnota užítka $u(a_i)$
(a_1) Tepelné čerpadlo vzduch/voda	0,62884
(a_2) Tepelné čerpadlo země/voda	0,55259
(a_3) Elektrický kotel	0,33

7. Závěr

Cílem této práce byl návrh vytápění rodinného domu tepelným čerpadlem a ověření jeho technických možností, aby byla udržena ekonomická výhodnost celého systému vzhledem k době jeho provozu. Varianty vytápění pomocí tepelných čerpadel jsou navrženy tak, aby bylo využito maximálně výhod, které tepelné čerpadlo poskytuje. Podlahové vytápění v nízkém teplotním spádu a ohřev teplé užitkové vody během celého roku přináší významné úspory a zlevňují cenu tepla. Porovnáním investičních a provozních nákladů všech tří navržených variant jsem určil dobu návratnosti investice do tepelných čerpadel, která je pro variantu a_1 v délce 15 let a u varianty a_2 je návratnost 13 let. Tyto návratnosti se mohou lišit na základě změny klimatických podmínek a z toho plynoucí změna provozu celé soustavy vytápění. Při zahrnutí růstu cen energií, který se dá v dlouhodobé perspektivě předpokládat, se doba návratnosti investic do tepelných čerpadel významně zkracuje. Při uvažování růstu cen elektrické energie o pouhé jedno procento ročně, se doba návratnosti pro tyto navržené systémy tepelných čerpadel zkracuje přibližně o jeden rok. Pokud by růst cen dosáhl každý rok v průměru 5%, doba návratnosti by se již zkrátila o více než 4 roky. Z toho vyplývá, že s rostoucí cenou elektrické energie se také zvyšují její úspory při užívání tepelných čerpadel. Při současné možnosti využití podpory z programu Zelená úsporám by se doba návratnosti investice do variant tepelných čerpadel ještě více snížila. U varianty tepelného čerpadla vzduch/voda by doba návratnosti klesla na 13 let a u tepelného čerpadla země/voda na 10 let. Při uvažování růstu cen by tato doba byla opět ještě kratší.

Aby posouzení bylo co nejvíce objektivní nastolil jsem čtyři kritéria, která jsou aplikovatelná na všechny tři varianty vytápění a podle těchto kritérií a použití multikriteriální analýzy jsem našel variantu vytápění s největším užitekem jak ukazuje Tab. 19. V praxi při volbě každého systému vytápění je hlavním kritériem jeho pořizovací cena, proto její váha byla při analýze nejpodstatnější. Investice do soustavy tepelného čerpadla je poměrně vysoká, ale nízké provozní náklady, dlouhá životnost a snížení globálního dopadu na životní prostředí jsou hlavní argumenty, které převažují nad pouze investičními náklady. Díky tomu varianta tepelného čerpadla vzduch/voda, i přes největší pořizovací cenu, dosáhla největšího užitku, jak ukazuje Tab. 19 a to i díky stále více užívaným moderním prvkům, které zvyšují životnost a efektivitu tepelných čerpadel.

Výsledkem této práce je tedy jednoznačná přednost tepelných čerpadel před klasickým elektrickým vytápěním pomocí elektrických kotlů nebo přímotopných konvektorů. To dokazuje hodnocení podle zvolených kritérií a také doba návratnosti investice, která je kratší než životnost tepelných čerpadel.

Do budoucna mohou tepelná čerpadla získávat stále více na důležitosti a to například díky rozvoji techniky využívající geotermální energii či implementace systému malých fotovoltaických elektráren do soustavy tepelného čerpadla. Tím by mohl být v budoucnu celý systém vytápění stále více energeticky soběstačný, a to nejen u rodinných domů.

Seznam použité literatury

- [1] HRADÍLEK, Zdeněk. *Energetika průmyslových a distribučních sítí*. 1. vyd. 2008. ISBN 987-80-7225-291-6.
- [2] VIESSMANN. *Projekční návod systém s tepelnými čerpadly*. 2008
- [3] KARLÍK, Robert. *Tepelné čerpadlo pro váš dům*. 1.vyd. 2009. ISBN 978-80-247-2720-2.
- [4] SRDEČNÝ, Karel. TRUXA, Jan. *Tepelná čerpadla*. 1.vyd. 2009. ISBN 978-80-87333-02-0
- [5] KLASS, Marc. *Odborný seminář Tepelná čerpadla VITOCAL*. 2009
- [6] KUČA, Stanislav. *Odborná konzultace ve firmě Green Gas DPB a.s.* 2010.
- [7] Green Gas DPB, a.s. *Vrty pro tepelná čerpadla, hlubinné vrty, sanační, Hydrovrty* [online].c2010, [cit.2010]. Dostupné z: <<http://www.dpb.cz/vrty-pro-tepelna-cerpadla-rozdeleni/>>.
- [8] VIESSMANN, Odborná řada. *Tepelná čerpadla*. [online].c2008, [cit.02-05-2010]. Dostupné z: <<http://www.viessmann.cz/cs/services/drucksachen/fachreihen.html>>.
- [9] DAHLSVEEN, Trond. *Energetický audit budov*. 1.vyd. 2003. ISBN 80-88905-86-9.
- [10] MÁTZ, Václav. *TZB-info* [online].c2010, [cit.3-4-2010].Dostupné z: <<http://vytapani.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=6294&h=210&pl=39>>.
- [11] KABELE, Karel. Veverková Zuzana. *Modelování operativní teploty* [online].c2004, [cit.3-4-2010].Dostupné z: <<http://www.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=1422>>.
- [12] REINBERK, Zdeněk. *Potřeba tepla pro vytápění a ohřev teplé vody* [online].c2009, [cit.10-12-2009].Dostupné z: <<http://www.tzb-info.cz/t.py?t=16&i=47&h=38>>.
- [13] BAJER, Petr. *Portál divoch.net* [cit.20-04-2010]. Dostupné z: <<http://pocasi.divoch.cz/ostava.php>>.
- [14] VIESSMANN. *Viessmann Vitocal 222-G* [online]. c2010, [cit.27-04-2010]. Dostupné z: <http://www.viessmann.cz/cs/products/Heat_pumps/vitocal_222-g.html>.
- [15] VIESSMANN. *Viessmann Vitocal 300-A* [online]. c2010, [cit.27-04-2010]. Dostupné z: <http://www.viessmann.cz/cs/products/Heat_pumps/vitocal_300-a.html>.
- [16] PROTHERM. *Kotel rejnok 9K* [online]. c2010, [cit.3-4-2010]. Dostupné z: <<http://www.protherm.cz/component.php?cocode=catalogue&itid=48&icid=11>>.
- [17] TZB-info. *Porovnání nákladů na vytápění podle duhu paliva* [online]. c2010, [cit.3-4-2010]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/t.py?t=16&i=269&energie_gj=126.8>.
- [18] ČSN 06 0210 Výpočet tepelných ztrát budov
- [19] ČSN 06 0830 Tepelné soustavy v budovách - Zabezpečovací zařízení

Seznam příloh

Příloha 1 Stavební projekt rodinného domu v Darkovičkách.

Příloha 2 Výkonové diagramy tepelných čerpadel VITOCAL 222-G a VITOCAL 300-A

Příloha 3 Zobrazení způsobu rozvodu podlahového vytápění

Příloha 4 Zobrazení návrhu teplovodního vytápění pomocí otopných těles

Příloha 5 Soupis materiálu potřebného pro podlahové vytápění

Příloha 6 Výpis konstrukčních materiálu využitých pro výpočet tepelných ztrát



Příloha 7 Diagram tep. čerpadla VITOCAL 300-A pro určení průměrného topného faktoru

Příloha 8 Cenové nabídky firmy VISSMANN na systémy tepelných čerpadel VITOCAL 222-G a VITOCAL 300-A

Příloha 9 CD-ROM obsahující materiály použité a vytvořené při tvorbě této práce

The floor plan shows a building layout with the following details:

- Rooms and Areas:** Labeled with numbers 1.01 through 1.14. Room 1.03 is a bathroom containing a toilet, sink, and bathtub. Other rooms include corridors, storage areas, and open spaces.
- Dimensions:** Various dimensions are provided in millimeters (e.g., 1700, 1500, 1300, 1100, 900, 800, 700, 600, 500, 400, 300, 200, 100) and meters (e.g., 4.50, 3.50, 2.50, 1.50, 0.50).
- Structural Elements:** Walls are shown with red hatching. Doors are indicated by arcs and swing directions. Windows are shown with green hatching. Stairs are located in the bottom right corner.
- Orientation:** A north arrow is located at the top center of the plan.
- Scale:** A scale bar is located at the bottom left, showing a distance of 4.50 meters.

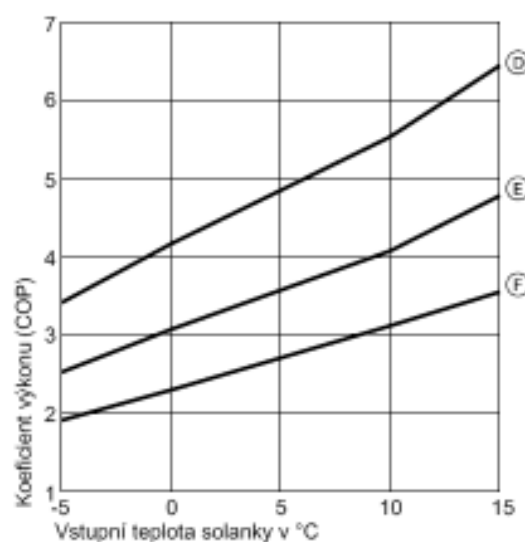
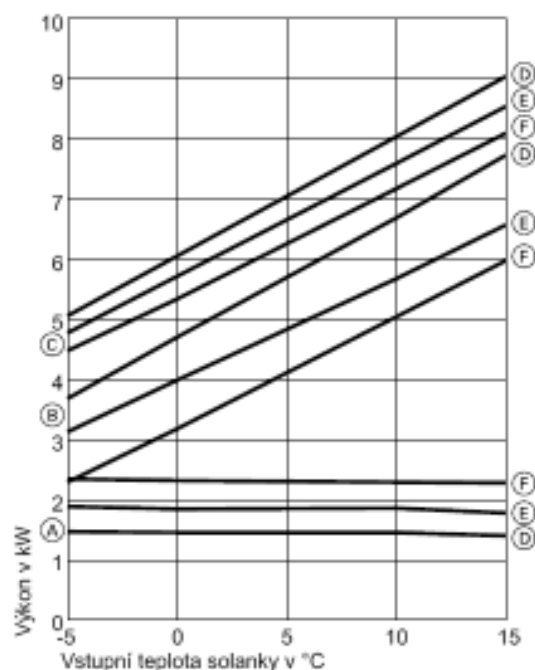
ГЕОМЕТРИЯ	ТИП ПРОБЛЕМЫ	РЕЗУЛЬТАТ	МАКЕТ
	4 × ИЗМЕНЕНИЕ МЕДИАННОЙ ПОСРЕДСТВЕННОЙ ПТН 32,8 ± 0,9%	1000 ± 2,00 ± 70 мм	2
	4 × ИЗМЕНЕНИЕ МЕДИАННОЙ ПОСРЕДСТВЕННОЙ ПТН 32,8 ± 0,9%	1000 ± 2,00 ± 70 мм	2
	4 × ИЗМЕНЕНИЕ МЕДИАННОЙ ПОСРЕДСТВЕННОЙ ПТН 32,8 ± 0,9%	1000 ± 2,00 ± 70 мм	2
	4 × ИЗМЕНЕНИЕ МЕДИАННОЙ ПОСРЕДСТВЕННОЙ ПТН 32,8 ± 0,9%	1000 ± 2,00 ± 70 мм	2
	4 × ИЗМЕНЕНИЕ МЕДИАННОЙ ПОСРЕДСТВЕННОЙ ПТН 32,8 ± 0,9%	1000 ± 2,00 ± 70 мм	2
	3 × ИЗМЕНЕНИЕ МЕДИАННОЙ ПОСРЕДСТВЕННОЙ ПТН 32,8 ± 0,9%	1000 ± 2,00 ± 70 мм	2
	3 × ИЗМЕНЕНИЕ МЕДИАННОЙ ПОСРЕДСТВЕННОЙ ПТН 32,8 ± 0,9%	1000 ± 2,00 ± 70 мм	2
	3 × ИЗМЕНЕНИЕ МЕДИАННОЙ ПОСРЕДСТВЕННОЙ ПТН 32,8 ± 0,9%	1000 ± 2,00 ± 70 мм	2
	3 × ИЗМЕНЕНИЕ МЕДИАННОЙ ПОСРЕДСТВЕННОЙ ПТН 32,8 ± 0,9%	1000 ± 2,00 ± 70 мм	2
	3 × ИЗМЕНЕНИЕ МЕДИАННОЙ ПОСРЕДСТВЕННОЙ ПТН 32,8 ± 0,9%	1000 ± 2,00 ± 70 мм	2

[illegible]

 ZIMB 1 (EHEL) POSTHEM 48 P40, P95 NA MALUUS MS
 ZIMB 2 (EHEL) PROTHEM 28 P40, P90 NA MALUUS MS
 —ZIMB 1 (EHEL) POSTHEM 24 P40, P95 NA MALUUS MS
 —PAGLEY 1971
 ZIMB 2 (EHEL) PROTHEM 116 P40, P90 NA MALUUS MS

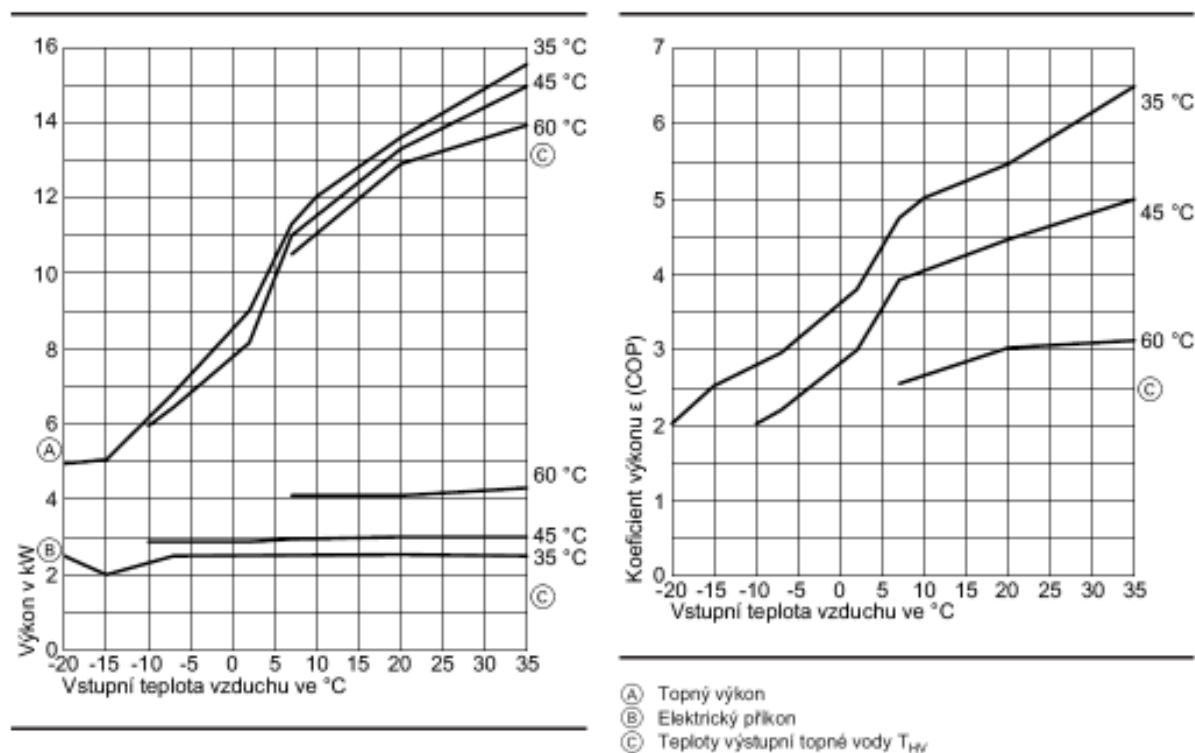
[illegible]

Typ BWT 106

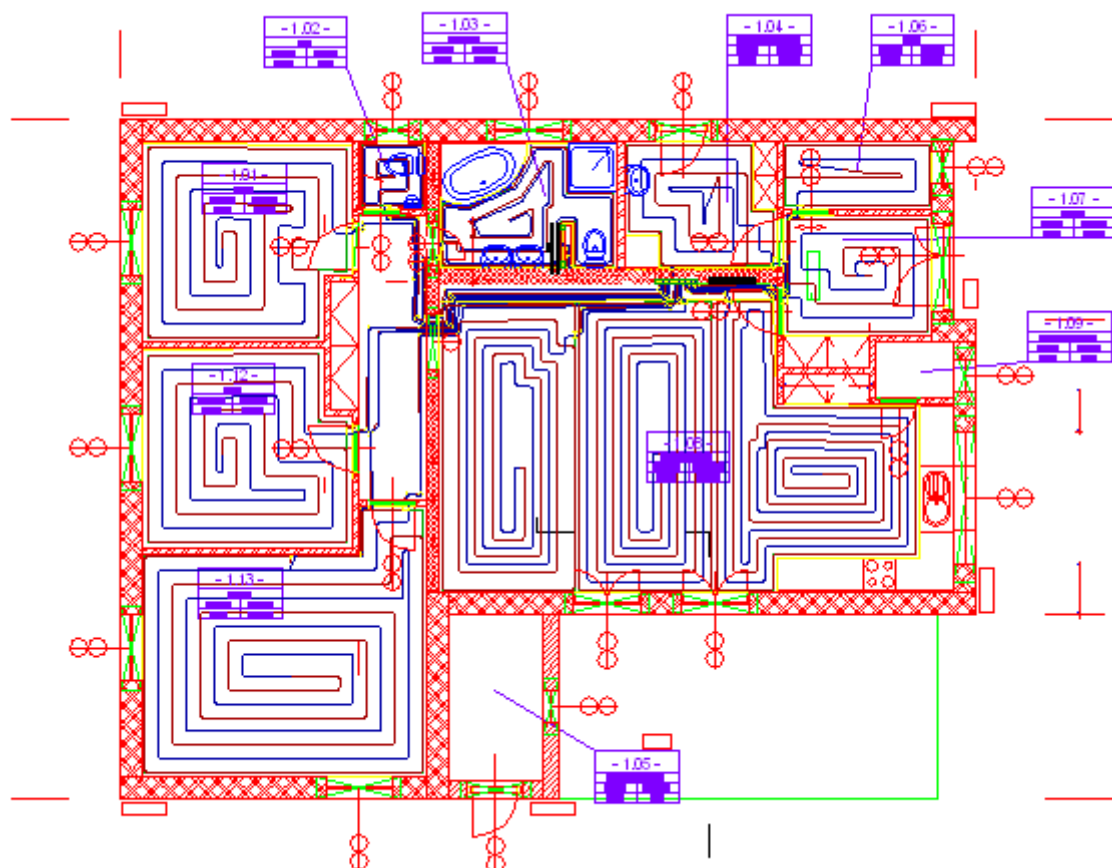


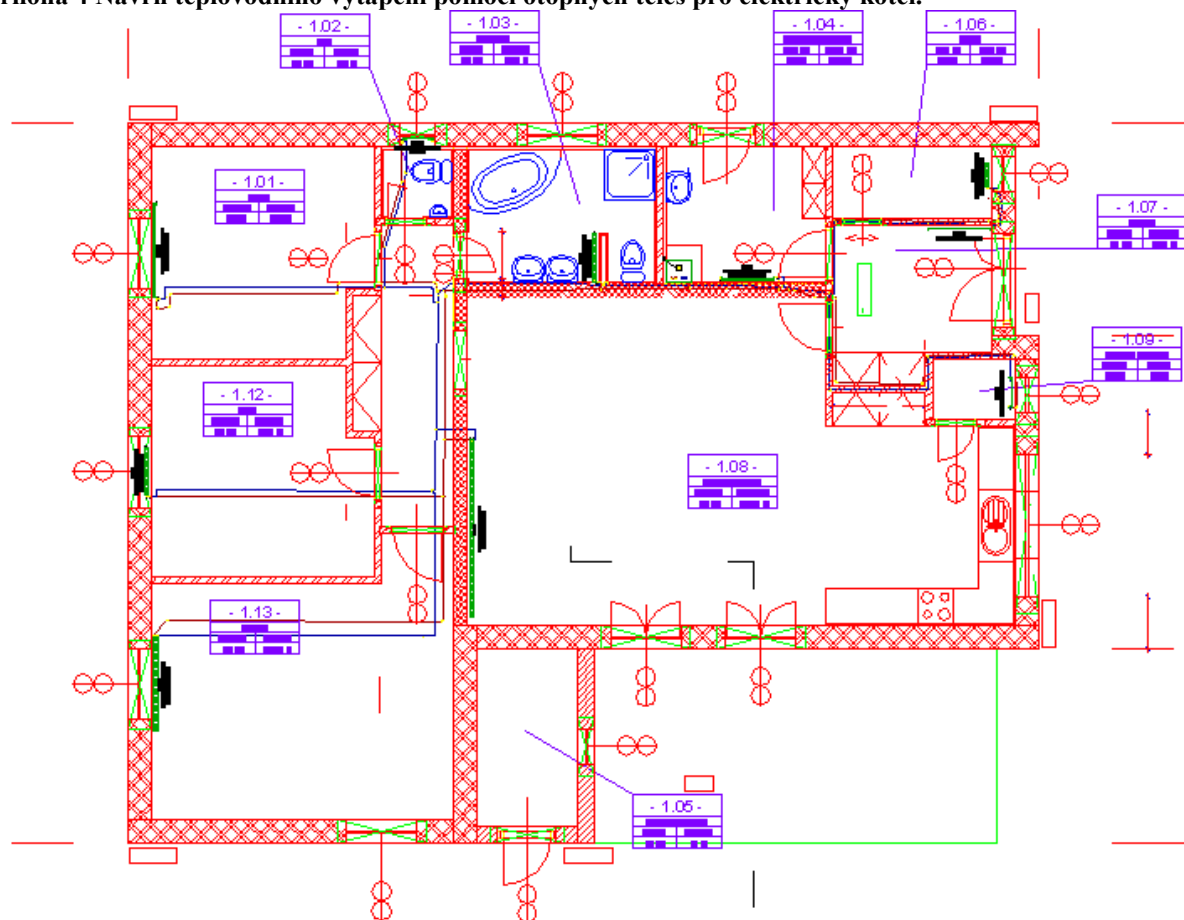
- (A) Elektrický výkon
 (B) Chladicí výkon
 (C) Topný výkon
 (D) $T_{\text{HV}} = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$
 (E) $T_{\text{HV}} = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$
 (F) $T_{\text{HV}} = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$
 T_{HV} Výstupní teplota topné vody

Vitocal 300-A, 400 V



Příloha 3 Rozložení teplovodního podlahového vytápění pro tepelná čerpadla.



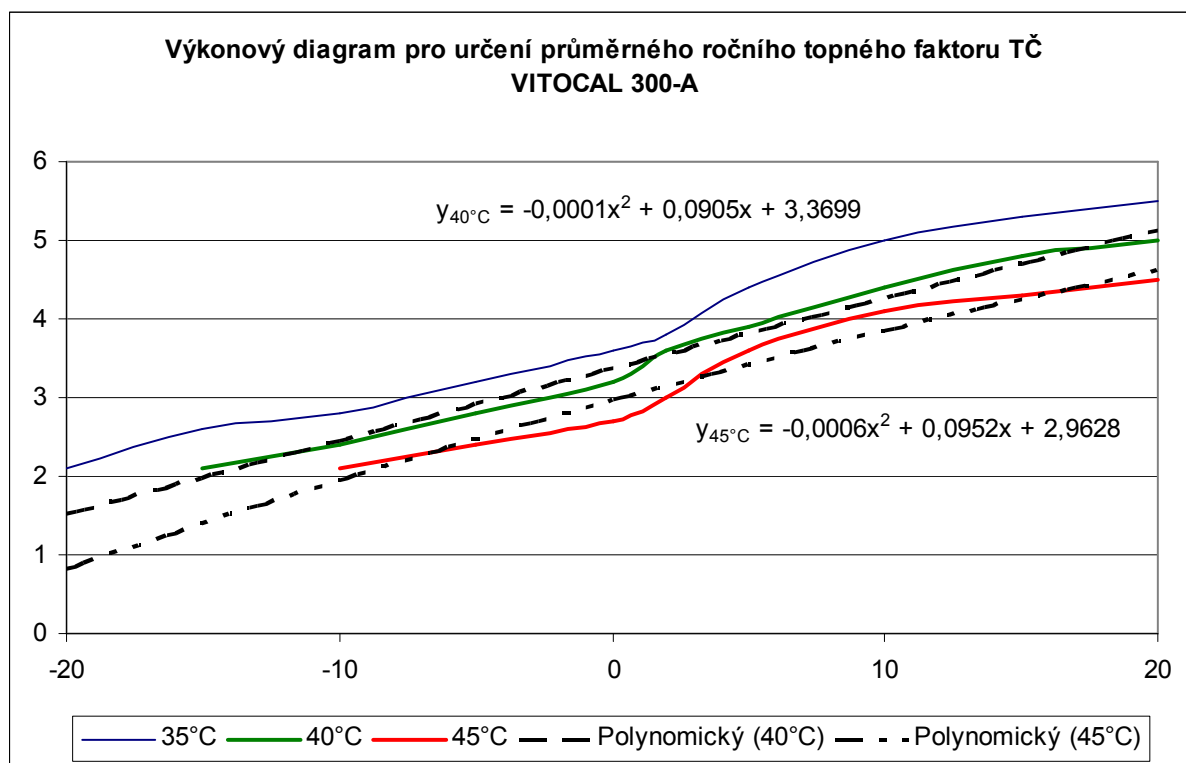
Příloha 4 Návrh teplovodního vytápění pomocí otopných těles pro elektrický kotel.**Příloha 5 Soupis a cena materiálu pro rozvod podlahového vytápění.**

Materiál	Množství	Jednotka	Jednotková cena	Celková cena
Vícevrstvé potrubí ALPEX - THERM XS (PV) 16x2,0	23	m	34	782 Kč
Vícevrstvé potrubí ALPEX - THERM XS (PV) 20x2,0	442	m	50	22 079 Kč
Fixační lišta pro potrubí WL 20 mm (64 / 4 m)	71	m	79	5 609 Kč
Sestava rozdělovač/sběrač - pro podlahové vytápění 12-cestný	1	ks	12934	12 934 Kč
Fixační příchytka na trubky rovná	901	ks	2	1 802 Kč
Folie reflexní rastrovaná - FR 0,2x2000 mm (2 x 150 m)	79	m	24	1 896 Kč
Obvodový dilatační pás samolepící s fólií DP 50 tl. 10 mm, š. 160 mm (50 / 250 m)	122	m	20	2 440 Kč
Plastifikátor PL 10 BAKELITE MF	0,18	kg	65	12 Kč
Cementová mazanina				1 000 Kč
Otopné těleso - KORALUX RONDO - M 1830/750 (Bílá RAL 9010)	1	ks	4720	4 720 Kč
Termostatická hlavice OPTIMA DH 01 chrom	1	ks	525	525 Kč
Kompaktní koupelnový připojovací ventil OPTIMA DV 103 chrom 1/2" x M 24	1	ks	1246	1 246 Kč
			Suma	55 044 Kč

Příloha 6 Soupis konstrukčních materiálů pro výpočet tepelných ztrát

Konstrukce	Materiál	Tloušťka (m)	Plocha (m ²)	U (W.m ⁻² .K ⁻¹)
SO1	cihly POROTHERM 38+Polystyren 10cm	0,42	-	0,242
SO2	cihly POROTHERM 30+Polystyren 10cm	0,35	-	0,373
SN1	cihly POROTHERM 11,5+vápenná omítka	0,12	-	1,658
SN2	cihly POROTHERM 25+vápenná omítka	0,255	-	1,059
OZ1	Plastová okno-3komorvá	-	1,8	1,1
OZ2	Plastová okno-3komorvá	-	2,82	1,1
OZ3	Plastová okno-3komorvá	-	0,42	1,1
OZ4	Plastová okno-3komorvá	-	1,68	1,1
OZ5	Plastová okno-3komorvá	-	0,96	1,1
OZ6	Plastová okno-3komorvá	-	0,48	1,1
DO1	Dveře ochlazované euro	-	1,58	1,3
DO2	Dveře ochlazované euro	-	2,76	1,3
DN1	Dveře vnitřní dřevěné plné	-	1,58	2
DN1	Dveře vnitřní dřevěné plné	-	1,18	2
PDL1	Podlaha Pískovec, železobeton, izolace 80mm	-	-	0,369
STR1	Izolace ROCKMIN 16cm, Sádrová omítka, vzduchová mezera	0,325	-	0,213
SCH	Střecha-neobytný prostor- Bramac tašky, dřevo obložení	0,18	-	3,65

Příloha 7 Výkonový diagram a spojnice trendu pro určení průměrného ročního topného faktoru u VITOCAL 300-A



Příloha 8 Cenová nabídka na soustavu tepelného čerpadla VITOCAL 300-A, VITOCAL 222-G

Strana: 2 k nabídkce 9720004983 od 20.4.2010
 Zákazník: Jan Šrámek,
 Project: Jan Šrámek - Vitocal 300 A



Poz	Označení materiálu	Množství	Jednotková cena	Rabat	Suma
10	Vitocal 300-A reverzibilní AW-O 400 V, 3-9 kW Objed. číslo:: Z007802	1,00	246 110,00		246 110,00
20	Čerp. sekun. okruhu Grunfos (UPS 25-60) Objed. číslo:: 7338851	1,00	3 800,00		3 800,00
30	3-cestný přepínací ventil DN 25 Objed. číslo:: 7814924	1,00	4 660,00		4 660,00
40	Malý rozdělovač Objed. číslo:: 7143779	1,00	2 390,00		2 390,00
50	Průtokový ohřívač topné vody 3/6/9 kW Objed. číslo:: Z006464	1,00	12 380,00		12 380,00
60	Vitocell-V 100 CVW 390l Objed. číslo:: Z002885	1,00	48 980,00		48 980,00
70	Elektrické připojovací kabely (30m) Objed. číslo:: Z006453	1,00	5 860,00		5 860,00
80	Čidlo teploty zásobníku bez konektoru Objed. číslo:: 7170965	2,00	1 470,00		2 940,00
90	Vitotrol 200 Objed. číslo:: 7450017	1,00	2 390,00		2 390,00
100	Vitocell 100-E SVW 200l akumul.zás. Objed. číslo:: Z005026	1,00	15 930,00		15 930,00
	Součet položek				345 440,00
	20,00 % Daň z přidané hodnoty		345 440,00		69 088,00
	Součet v CZK				414 528,00

Strana: 2 k nabídce 9720004980 od 20.4.2010
 Zákazník: Jan Šrámek,
 Project: Jan Šrámek - Vitocal 222G



Poz	Označení materiálu	Množství	Jednotková cena	Rabat	Suma
10	Vitocal 222-G 6kW 400V Objed. číslo.: Z007887	1,00	144 250,00		144 250,00
20	Sada přísl. prim. okruhu do 12,4 kW Objed. číslo.: Z007434	1,00	19 930,00		19 930,00
30	Rozděl. primár. okruhu-půdní kolektor Objed. číslo.: 7143762	1,00	15 260,00		15 260,00
40	Hlídač primárního tlaku Objed. číslo.: 9532663	1,00	3 520,00		3 520,00
50	Tepelné médium Tyfocor do TČ, 200 l Objed. číslo.: 9542602	1,00	11 900,00		11 900,00
60	Sada příslušenství primárního okruhu Objed. číslo.: 7418109	1,00	7 410,00		7 410,00
70	Přip. sada výstupu/zpátečky top. okruhu Objed. číslo.: 7417920	1,00	2 470,00		2 470,00
80	Hydraulická připojovací sada Objed. číslo.: Z007792	1,00	5 610,00		5 610,00
90	Připojovací sada cirkulace Objed. číslo.: 7417928	1,00	4 450,00		4 450,00
100	Průtokový ohříváč topné vody 9 kW Objed. číslo.: Z008081	1,00	7 020,00		7 020,00
110	Čidlo teploty zásobníku bez konektoru Objed. číslo.: 7170965	1,00	1 470,00		1 470,00
120	Vitotrol 200 Objed. číslo.: 7450017	1,00	2 390,00		2 390,00
130	Vitocell 100-E SVW 200l akum.zás. Objed. číslo.: Z005026	1,00	15 930,00		15 930,00
	Součet položek				241 610,00
	20,00 % Daň z přidané hodnoty		241 610,00		48 322,00
	Součet v CZK				289 932,00